

Sistema de detecção de falhas em rectificadores de tracção

Rui Manuel Couto Barbosa



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Rua Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

Fevereiro de 2008

Sistema de detecção de falhas em rectificadores de tracção

Rui Manuel Couto Barbosa

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Trabalho realizado sobre a orientação de:
Eng.º Vítor Ferreira da EFACEC Sistemas de Electrónica, S.A.
e supervisão de:
Professor Adriano da Silva Carvalho,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

(O Presidente do Júri, Professor Doutor António Moreira)

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Rua Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

Fevereiro de 2008

Resumo

Neste projecto foram estudados métodos de detecção de falhas em díodos de rectificadores de tracção. Após um estudo das falhas de díodos semicondutores e suas consequências, são propostos métodos para detecção de falhas quer por curto-circuito, quer por circuito aberto dos díodos de um rectificador.

Um dos métodos baseia-se no uso de opto-emissores em paralelo com os díodos, aproveitando-se das características da tensão para detecção de falhas no funcionamento dos semicondutores. Este método funciona correctamente para uma configuração de rectificador com vários díodos em série por braço e foi desenvolvido como projecto para ser implementado em rectificadores existentes com esta característica.

Outro método estudado faz uso de sensores de corrente para, através da sua análise detectar as falhas. Este último método foi estudado para dar resposta á ineficácia do método anterior no caso das configurações de rectificadores com vários díodos em paralelo.

Abstract

This report focuses in the study of diode fault detection systems to be applied in traction rectifiers. After a study of diode faults and its consequences, fault detection methods are proposed for both the event of a short-circuit fault and an open circuit fault of a diode.

One of the methods bases itself in the use of opto-emitters in parallel with the diodes, using the voltage characteristics to detect failed diodes. This method works fine for a rectifier with multiple diodes in series and it was developed as a project to be implemented in existing rectifiers.

Another studied method uses current sensors in order to detect failures. This method was studied to cover the rectifier configurations which use multiple paralleled diodes.

Prefácio

O projecto foi realizado no decorrer de um estágio na empresa EFACEC – Sistemas de Electrónica, S.A. (EFACEC SE) com instalações na Zona Industrial da Maia.

A oportunidade de desenvolver um sistema de detecção de falhas surgiu no âmbito de um projecto de actualização de três grupos rectificadores de tracção da companhia paulista de trens metropolitanos. Pretendia-se neste projecto, encomendado à EFACEC Brasil, reformar os rectificadores incluindo o sistema de detecção e sinalização de falhas de díodos. Na sequência disto foi encomendado à EFACEC SE o projecto do sistema de detecção de falhas de díodos por curto-circuito.

Este projecto foi assim aproveitado para estudar e desenvolver um sistema de detecção de falhas de díodos em rectificadores de tracção tanto por curto-circuito como por circuito aberto.

Aos Meus Pais e Avós

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos colaboradores da EFACEC, Sistemas de Electrónica, S.A. que trabalharam comigo no gabinete de Investigação e Desenvolvimento da Divisão de Sistemas de Alimentação. Nomeadamente ao meu orientador, o Eng.º. Vítor Ferreira, e também ao Eng.º. Lino Paupério e Eng.º Nuno Costa e aos meus colegas estagiários Ricardo Barbosa e Jorge Lopes.

Queria agradecer também ao Eng.º. Nuno Delgado e ao Professor Adriano Carvalho pela criação desta oportunidade de estágio que apreciei bastante.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.1.1 Grupo EFACEC.....	1
1.1.2 EFACEC Sistemas de Electrónica, S.A.....	1
1.1.3 EFACEC do Brasil Ltda.....	2
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivos	3
1.4 Estrutura do Relatório	3
2. Rectificadores e Detecção de Falhas	5
2.1 Rectificadores de Tracção	5
2.1.1 Configurações usuais.....	7
2.1.2 Harmónicos.....	9
2.1.2.1 Causas dos harmónicos	9
2.1.2.2 Indicadores de harmónicos.....	11
2.1.2.3 Efeitos de harmónicos	13
2.2 Sistemas de Detecção de Falhas.....	14
3. Trabalho do Autor	17
3.1 Estudo de Protecções de Rectificadores.....	17
3.1.1 Protecção contra sobretensões	17
3.1.2 Circuitos Snubber	18
3.1.3 Fusíveis.....	19
3.1.4 Ligação em série e paralelo de díodos.....	22
3.2 Estudo de Falhas em Rectificadores.....	24
3.2.1 Falhas de díodos	24
3.2.2 Curto-circuito externo.....	25
3.2.2.1 Corrente no primário do transformador	27
3.2.2.2 Corrente na saída do transformador	28

3.2.2.3	Exemplo de Cálculo	29
3.2.3	Curto-circuito interno	31
3.2.4	Conclusões sobre curto-circuitos	33
3.2.5	Circuito aberto de díodos ou braços.....	33
3.3	Sistema de detecção de falhas baseado em opto-emissores	35
3.3.1	Rectificador.....	35
3.3.2	Requisitos	36
3.3.3	Projecto	37
3.3.3.1	Simulação do funcionamento do rectificador.....	37
3.3.3.2	Estudo das características do rectificador	38
3.3.3.3	Detecção de curto-circuito baseada em opto-emissores.....	40
3.3.3.4	Detecção de circuito aberto de díodos.....	42
3.3.3.5	Esquema geral da solução	45
3.3.3.6	Circuito de detecção de curto-circuito.....	46
3.3.3.7	Circuito de detecção de circuito aberto	48
3.3.3.8	Ligação por fibra óptica	50
3.3.3.9	Circuito lógico para sinalização	51
3.3.4	Implementação.....	53
3.3.4.1	Carta electrónica única	53
3.3.4.2	Placa de opto-emissor.....	54
3.3.4.3	Placa de detecção	55
3.3.4.4	Ligação do sistema completo	59
3.4	Estudo de um Sistema para Díodos em Paralelo	61
3.4.1	Introdução	61
3.4.2	Princípio de Funcionamento	62
4.	Testes da Carta	65
5.	Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento	69

Lista de Figuras

FIGURA 1: MONTAGEM DE RECTIFICADORES	XXI
FIGURA 2: ÍNDICE DE PULSAÇÃO	XXII
FIGURA 3: LOGÓTIPO DA EMPRESA E ÁREA DE NEGÓCIOS	2
FIGURA 4: SISTEMAS DE ELECTRIFICAÇÃO FERROVIÁRIA NA EUROPA [15]	6
FIGURA 5: DOIS RECTIFICADORES DE TRACÇÃO PRODUZIDOS PELA EFACEC [13]	7
FIGURA 6: TOPOLOGIA EM PONTE DE GRAËTZ	7
FIGURA 7: ESQUEMA DE UM RECTIFICADOR DE 18 PULSOS [16]	8
FIGURA 8: APROXIMAÇÃO DA ONDA QUADRADA PELA SOMA DE TRÊS SINUSÓIDES	9
FIGURA 9: CORRENTES HARMÓNICAS EM CARGAS NÃO LINEARES	9
FIGURA 10: CORRENTES HARMÓNICAS NA REDE[22]	10
FIGURA 11: CORRENTE COM HARMÓNICOS DE UMA FASE NUM RECTIFICADOR	11
FIGURA 12: DETECÇÃO DE CIRCUITO ABERTO POR AMPLITUDE DO RIPPLE[5]	15
FIGURA 13: DETECÇÃO DE CIRCUITO ABERTO COM TRANSFORMADORES DE CORRENTE[2]	15
FIGURA 14: DETECÇÃO DE FALHAS USANDO OUTRA PONTE DETECTORA[1]	16
FIGURA 15: DETECÇÃO DE FALHAS USANDO OUTRA PONTE DETECTORA[4]	16
FIGURA 16: PROTECÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES	18
FIGURA 17: SNUBBER RC PARA UM DÍODO	19
FIGURA 18: EFEITOS DE UM SNUBBER RC PARA UM DÍODO [9]	19
FIGURA 19: COLOCAÇÃO DOS FUSÍVEIS	20
FIGURA 20: CARACTERÍSTICA CORRENTE-TEMPO DE FUSÍVEL E DISPOSITIVO	20
FIGURA 21: BASE PARA FUSÍVEL COM MICROCONTACTO [12]	21
FIGURA 22: DÍODO COM FUSÍVEL COM MICROCONTACTO E SNUBBER RC	22
FIGURA 23: DÍODOS EM SÉRIE COM SNUBBER RC E RESISTÊNCIA DE BALANÇO DE TENSÕES R.....	22
FIGURA 24: DÍODOS EM PARALELO COM FUSÍVEL COM MICROCONTACTO E SNUBBER	23
FIGURA 25: CARACTERÍSTICA I-V DE UM DÍODO	24
FIGURA 26: ESQUEMA DE UM CURTO-CIRCUITO EXTERNO	26
FIGURA 27: CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - REGIME ASSIMÉTRICO E SIMÉTRICO [11]	27
FIGURA 28: VALORES DE PICO DE CORRENTE ASSIMÉTRICA [7]	29
FIGURA 29: CIRCUITO DE SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO EXTERNO	29
FIGURA 30: FORMAS DE ONDA DE UM CURTO-CIRCUITO EXTERNO COM $X/R=\tan(75^\circ)$	31
FIGURA 31: ESQUEMA DE UM CURTO-CIRCUITO INTERNO	31

FIGURA 32: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA CURTO-CIRCUITO INTERNO	32
FIGURA 33: FORMAS DE ONDA DE UM CURTO-CIRCUITO INTERNO	32
FIGURA 34: FORMAS DE ONDA DE UM CURTO-CIRCUITO INTERNO COM $X/R=\tan(75^\circ)$	33
FIGURA 35: CIRCUITO DE SIMULAÇÃO DE BRAÇO EM CIRCUITO ABERTO	34
FIGURA 36: DIFERENÇA ENTRE FUNCIONAMENTO NORMAL E COM UM CIRCUITO ABERTO	34
FIGURA 37: ESQUEMA DO GRUPO TRANSFORMADOR-RECTIFICADOR	35
FIGURA 38: COMPOSIÇÃO DE UM BRAÇO	36
FIGURA 39: CIRCUITO PARA SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DO RECTIFICADOR	37
FIGURA 40: TENSÕES DE FUNCIONAMENTO NORMAL	37
FIGURA 41: TENSÃO D.C. IDEAL NÃO FILTRADA DE UM RECTIFICADOR HEXAFÁSICO	38
FIGURA 42: TENSÃO INVERSA SOBRE UM BRAÇO DO RECTIFICADOR HEXAFÁSICO	39
FIGURA 43: CONFIGURAÇÃO DOS OPTO-EMISSORES	40
FIGURA 44: FORMAS DE TENSÃO INVERSA SOBRE DÍODOS EM FUNCIONAMENTO.....	41
FIGURA 45: FORMA DE TENSÃO SOBRE DÍODO EM CIRCUITO ABERTO	43
FIGURA 46: MONTAGEM DOS OPTO-EMISSORES.....	43
FIGURA 47: FORMAS DE TENSÃO COM UM DÍODO EM CIRCUITO ABERTO.....	44
FIGURA 48: FORMAS DE TENSÃO COM DOIS DÍODOS EM CIRCUITO ABERTO	45
FIGURA 49: DESENHO PRELIMINAR DO SISTEMA.....	45
FIGURA 50: CIRCUITOS DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO.....	46
FIGURA 51: PREVISÃO DE ONDAS DO CIRCUITO DE DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO	48
FIGURA 52: CIRCUITOS DE DETECÇÃO DE CIRCUITO ABERTO	49
FIGURA 53: PREVISÃO DE ONDAS DO CIRCUITO DE DETECÇÃO DE CIRCUITO ABERTO.....	50
FIGURA 54: ASPECTO DOS OPTO-EMISSORES E OPTO-DETECTORES	50
FIGURA 55: CIRCUITO COM PORTAS LÓGICAS PARA SINALIZAR CURTO-CIRCUITOS	52
FIGURA 56: CIRCUITO COM PORTAS LÓGICAS PARA SINALIZAR CIRCUITOS ABERTOS	53
FIGURA 57: CIRCUITO CONFIGURÁVEL DO OPTO-DETECTOR	53
FIGURA 58: ESQUEMA DA PLACA DE OPTO-EMISSOR	54
FIGURA 59: MONTAGEM DAS PLACAS DE OPTO-EMISSORES	54
FIGURA 60: FOTOGRAFIA DA PLACA PROTÓTIPO DE OPTO-EMISSORES	54
FIGURA 61: PLACA DE DETECÇÃO	55
FIGURA 62: ESQUEMA DA ALIMENTAÇÃO DA PLACA	56
FIGURA 63: ESQUEMA DA DETECÇÃO.....	56
FIGURA 64: ESQUEMA DO CIRCUITO LÓGICO.....	56
FIGURA 65: ASPECTO DO SOFTWARE DE PROGRAMAÇÃO DAS GAL	57
FIGURA 66: ESQUEMA DO CIRCUITO DAS SAÍDAS EM RELÉ	58

FIGURA 67: CONFIGURAÇÃO DOS RELÉS	58
FIGURA 68: LIGAÇÕES DO SISTEMA COMPLETO	59
FIGURA 69: FOTO DA PLACA DE PROTÓTIPO.....	60
FIGURA 70: RECTIFICADOR EM PONTE COM TRÊS DÍODOS EM PARALELO POR BRAÇO	61
FIGURA 71: CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES DE CORRENTE E MICROCONTACTOS	62
FIGURA 72: CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES E MICROCONTACTOS.....	63
FIGURA 73: DETECTORES NÃO USADOS	65
FIGURA 74: DETECTORES EM TESTE.....	66
FIGURA 75: LIGAÇÃO DO ESQUEMA DE TESTES.....	67

Lista de Tabelas

TABELA 1: TENSÕES NOMINAIS E SEUS LIMITES [14]	6
TABELA 2: PARÂMETROS RELEVANTES DE UM DÍODO	24
TABELA 3: PERCENTAGEM DE FALHAS POR TIPO DE DÍODOS [19]	25
TABELA 4: PLANEAMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO POR FIBRA ÓPTICA	51
TABELA 5: POSSÍVEIS FALHAS E SEUS MOTIVOS	66

Glossário

1. Rectificação

Conversão de corrente alternada em corrente contínua.

2. Comutação

Transferência de corrente entre dois trajectos de rectificação consecutivos.

3. Braço

Parte de um circuito que contém um elemento rectificador e que constitui um trajecto para a corrente rectificada.

4. Montagem simples

Montagem na qual as ligações de alimentação são percorridas por correntes unidireccionais.

5. Montagem dupla

Montagem na qual as ligações de alimentação são percorridas por correntes bidireccionais.

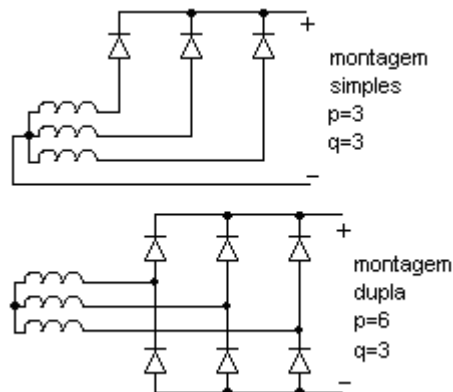


Figura 1: Montagem de rectificadores

6. Índice de pulsação **p** (IEC146-1-1):

Número de comutações não simultâneas que se produzem num período da tensão alternada



Figura 2: Índice de pulsação

7. *Ripple*

Diferença entre a tensão d.c. máxima e mínima.

8. Índice de comutação **q** (IEC146-1-1):

Número de comutações de um braço principal para outro que ocorrem durante um período de tensão alternada.

9. Tensão contínua ideal U_{di} (IEC146-1-1):

Tensão contínua média teórica do conversor sem carga. Supondo não haver redução de tensão por regulação de fase nem queda de tensão nos semicondutores nem subida de tensão com cargas baixas.

10. Tensão de curto-circuito e_z :

Tensão composta estabelecida, à corrente nominal e no secundário do transformador, com dois enrolamentos secundários do transformador em curto-circuito. Expressa-se normalmente em percentagem em relação à tensão composta nominal.

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O trabalho descrito neste relatório está enquadrado nos sistemas de protecção de rectificadores. Foi desenvolvido no decorrer de um estágio efectuado na empresa EFACEC – Sistemas de Electrónica, S.A. que teve como principal objectivo o projecto de um sistema de detecção de falhas de díodos em rectificadores de tracção existentes no Brasil.

Este sistema esteve inserido numa encomenda à empresa EFACEC Brasil, Ltda. para renovação de rectificadores de tracção existentes em São Paulo.

1.1.1 Grupo EFACEC

Constituído em 1948, o Grupo EFACEC é o maior grupo nacional de capitais portugueses, nos domínios da electrónica e da electromecânica. É formado por várias sociedades cujas actividades abrangem a concepção e produção de equipamentos, o design de sistemas e a concepção das soluções nas áreas de Energia, Transportes, Telecomunicações, Logística, Ambiente, Indústria, Edifícios e Serviços.

O Grupo EFACEC tem cerca de 2 mil colaboradores e factura aproximadamente 300 milhões de Euros, estando presente em mais de meia centena de países e exportando cerca de metade da sua produção [13].

1.1.2 EFACEC Sistemas de Electrónica, S.A.

A EFACEC Sistemas de Electrónica, S.A. é a empresa onde se desenvolveu o projecto e é dentro do Grupo EFACEC, através da unidade de Sistemas de Alimentação, a responsável

pela produção de sistemas de alimentação (UPS e rectificadores principalmente para centrais de telecomunicações), e conversores de potência (rectificadores de tracção), tendo competências também ao nível da electrónica de sinal e software utilizados no desenvolvimento de PSM (Power Supply Monitors) para os seus CIB (Carregadores Industriais de Baterias).

Foi, então, no gabinete de Investigação e Desenvolvimento, na unidade de Sistemas de Alimentação que foi desenvolvido o projecto.



Figura 3: Logótipo da empresa e área de negócios

1.1.3 EFACEC do Brasil Ltda

O Grupo EFACEC está actualmente presente no Brasil em São Paulo e em Salvador, para além dos vários locais onde decorre a execução de projectos [13].

1.2 Motivação

Os rectificadores de tracção são componentes vitais nos sistemas ferroviários. São equipamentos caros e que precisam de manter elevados níveis de fiabilidade e disponibilidade. Para isso necessitam de sistemas de protecção e detecção de falhas que sinalizem falhas de componentes e possibilitem a sua substituição atempada. Sistemas estes que permitam detectar falhas nos componentes do rectificadores sem que existam defeitos detectáveis no funcionamento do rectificador. Isto verifica-se para rectificadores com vários díodos por braço que são usados para aumentar a sua capacidade de corrente nominal e/ou tensão nominal, nos quais a falha de um díodo pode não ter efeitos na saída do rectificador mas sujeita os outros díodos a correntes e/ou tensões acima dos valores para que foram dimensionados podendo dar origem a falhas graves no rectificador.

A motivação principal para a realização deste trabalho foi a de encontrar uma forma simples e económica de detectar falhas recorrendo primeiro a sensores ópticos que não foram utilizados nos sistemas existentes e estudados.

1.3 Objectivos

O projecto tem como objectivo final a criação de uma carta electrónica que permita detectar as falhas dos díodos de cada braço de uma ponte rectificadora. As falhas podem ocorrer por curto-circuito ou por circuito aberto dos díodos. A carta irá ser validada e depois implementada em rectificadores de tracção já existentes.

Pretende-se também estudar/desenvolver um sistema mais geral que possa ser instalado com poucas alterações em várias configurações de sistemas rectificadores de tracção.

1.4 Estrutura do Relatório

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos dos quais, o primeiro é composto por esta introdução ao trabalho.

No segundo capítulo são apresentados os rectificadores de tracção, as configurações mais usuais para este tipo de conversores de potência e são discutidos alguns métodos existentes, ou já estudados, de detecção de falhas de díodos semicondutores em rectificadores.

O terceiro capítulo descreve o trabalho do autor e passa por um estudo de protecções existentes para rectificadores de potência, um estudo das falhas de rectificadores e suas consequências e a descrição pormenorizada do sistema de detecção de falhas projectado.

No quarto capítulo descreve-se o procedimento de testes desenvolvido para testar as cartas electrónicas criadas.

O último capítulo contém as conclusões gerais deste trabalho e apresenta algumas perspectivas de desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

2. Rectificadores e Detecção de Falhas

2.1 Rectificadores de Tracção

Os rectificadores de tracção são rectificadores de potência usados para rectificação de tensão para sistemas ferroviários que usam tensão d.c.. Estes sistemas usam a tensão d.c. para transmissão de energia eléctrica para o equipamento circulante onde a tensão é, geralmente, convertida em tensão a.c. de amplitude e/ou frequência controlada por um inversor de modo a alimentar os motores eléctricos da locomotiva.

Os sistemas de electrificação ferroviária que usam tensão d.c. e necessitam por isso de rectificadores são principalmente os de curtas distâncias como os de metros e trens urbanos mas também os de linhas ferroviárias nacionais de alguns países como Espanha, Itália e Bélgica. Em Portugal temos o exemplo do metro de Lisboa que usa uma tensão d.c. de valor standard de 750V num terceiro carril e do metro do Porto que usa a mesma tensão mas num sistema de catenária para transmissão de energia.

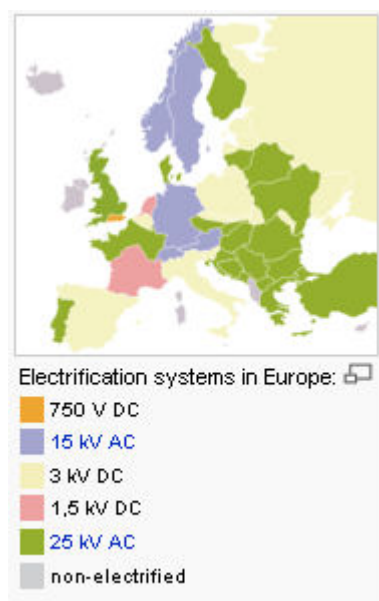


Figura 4: Sistemas de electrificação ferroviária na Europa [15]

Os sistemas de electrificação têm tensões normalizadas que se resumem no quadro seguinte retirado da norma EN50163. Para além dos valores nominais e limites de tensão a norma também define limites de frequência e metodologias de medição destas grandezas. A norma refere também que no futuro os sistemas de tracção d.c. de metros ligeiros e ferrovias locais devem usar os valores de 750V, 1500V, 3000V.

Tabela 1: Tensões nominais e seus limites [14]

Sistema de electrificação	Tensão não permanente mais baixa (V)	Tensão permanente mais baixa (V)	Tensão nominal (V)	Tensão permanente mais alta (V)	Tensão não permanente mais alta (V)
600 Vd.c.	400	400	600	720	800
750 Vd.c.	500	500	750	900	1000
1500 Vd.c.	1000	1000	1500	1800	1950
3000 Vd.c.	2000	2000	3000	3600	3900
15000 Va.c.	11000	12000	15000	17250	18000
25000 Va.c.	17500	19000	25000	27500	29000

A EFACEC - Sistemas de Electrónica, S.A. projecta e fabrica na unidade de Sistemas de Alimentação rectificadores de tracção para as três tensões normalizadas de 750V, 1500V , 3000V e para potências que vão acima dos 2MW.

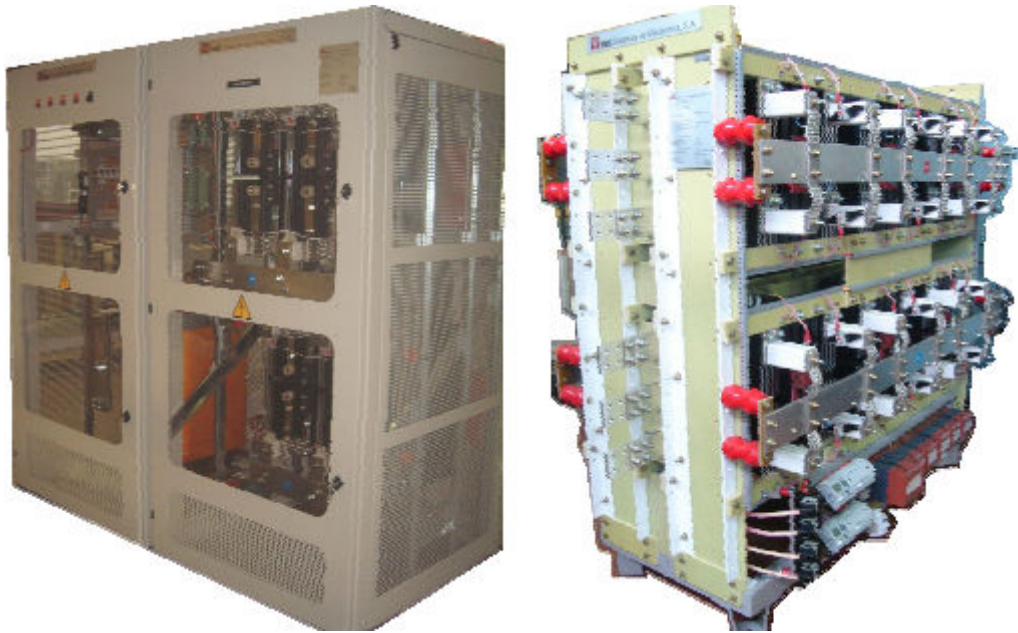


Figura 5: Dois rectificadores de tracção produzidos pela EFACEC [13]

2.1.1 Configurações usuais

As configurações mais usuais para rectificadores de tracção são as chamadas de pontes trifásicas ou pontes de Graëtz. Nesta configuração uma tensão trifásica pode ser rectificada com 6 pulsos ou $p=6$ (ver glossário) o que permite obter um *ripple* menor do que se obteria com um rectificador trifásico simples com retorno pelo neutro. Para além disso reduzem-se assim os harmónicos de maior amplitude que são os de frequência mais baixa.

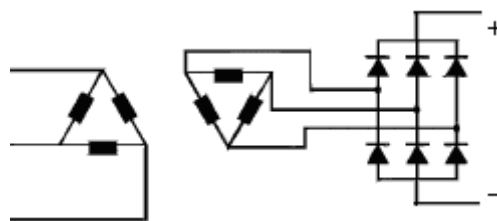


Figura 6: Topologia em ponte de Graëtz

Para se reduzirem ainda mais os harmónicos e tensão de *ripple* usam-se rectificadores de 12, 18 ou 24 pulsos usando associações de pontes de Graëtz que podem ser em série ou paralelo conforme se pretenda ter maior tensão ou maior corrente de saída, respectivamente.

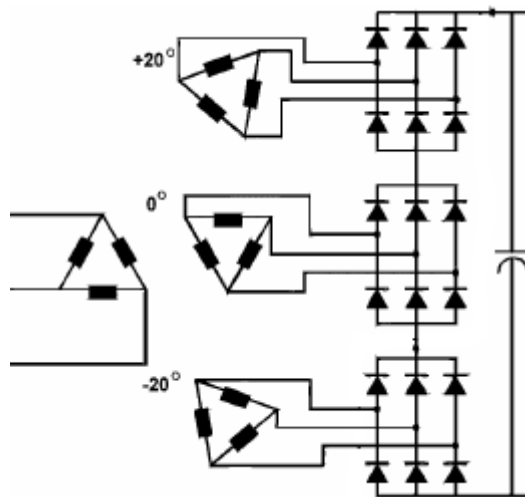


Figura 7: Esquema de um rectificador de 18 pulsos [16]

Para se obterem k pulsos num ciclo da tensão primária ($k=n*6$ e $n=1,2,3...$) é necessário que as existam n pontes alimentadas por n sistemas de tensões trifásicas desfasados entre si de $360/k^\circ$ (graus eléctricos). Para isso usam-se transformadores normalmente projectados à medida para se obter o desfasamento dos secundários requerido. Para além disso são ajustadas a amplitude de tensão secundária e a tensão de curto-circuito do transformador, que é um parâmetro essencial para o cálculo das correntes de curto-circuito do rectificador e portanto para o seu dimensionamento.

O projecto de um rectificador inclui também o cálculo de parâmetros de um transformador, chamando-se de grupo transformador-rectificador.

Nestas pontes trifásicas que podem ser associadas em série e paralelo é também frequente o uso de associações em série e paralelo de díodos em cada braço da ponte, de modo a aumentar a capacidade de tensão ou corrente, respectivamente.

Como a maioria dos rectificadores de tracção são compostos por associações de pontes de Graëtz no presente relatório apresentam-se alguns cálculos para uma topologia em ponte de Graëtz única.

2.1.2 Harmónicos

Chamam-se harmónicos, ou componentes harmónicos, a todos os componentes sinusoidais de uma onda que não sejam o componente fundamental e com frequência múltipla inteira deste. Isto vem do teorema de Fourier que diz que qualquer onda periódica pode ser decomposta numa série de componentes sinusoidais. Chama-se componente fundamental á componente sinusoidal de maior amplitude e de frequência igual á frequência da onda periódica.

Como exemplo, uma onda perfeitamente sinusoidal só tem a componente fundamental, enquanto que uma onda quadrada é composta por uma série infinita de sinusóides de ordem ímpar ($k_1 \sin(x) + k_3 \sin(3x) + k_5 \sin(5x) + \dots$).

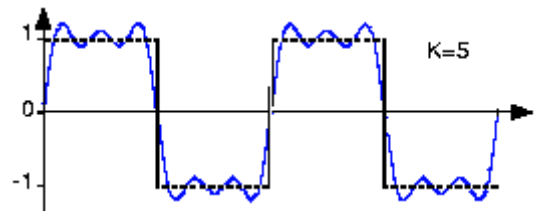


Figura 8: Aproximação da onda quadrada pela soma de três sinusóides

2.1.2.1 Causas dos harmónicos

Todos os rectificadores são cargas não lineares. As cargas não lineares são assim chamadas quando a corrente na sua entrada não segue a tensão. Estas cargas geram harmónicos de corrente e de tensão que podem ter efeitos nefastos noutros equipamentos eléctricos.

As cargas não lineares consomem correntes harmónicas que circulam na rede de distribuição. As tensões harmónicas são causadas pela circulação de correntes harmónicas nas impedâncias do sistema de distribuição.



Figura 9: Correntes harmónicas em cargas não lineares

A reactância de um condutor aumenta como função da frequência da corrente. Para cada corrente harmónica de ordem h , existe então uma impedância Z_h que cria uma tensão harmónica U_h . A tensão no ponto B é, por isso, distorcida e todos os dispositivos alimentados via o ponto B vão receber essa tensão.

Pode-se considerar que as cargas não lineares introduzem correntes harmónicas na rede de distribuição.

A figura seguinte mostra um esquema com vários tipos de cargas não lineares que afectam a qualidade da potência da rede.

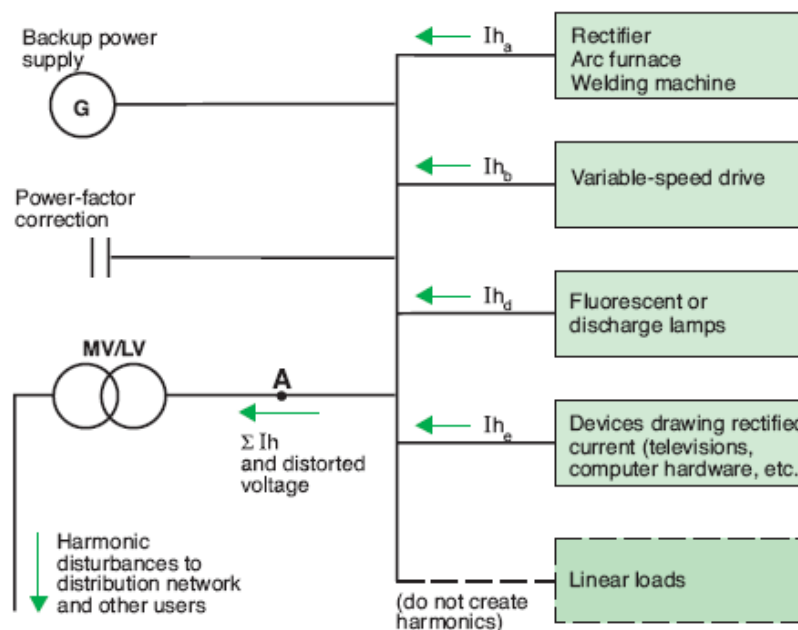


Figura 10: Correntes harmónicas na rede[22]

Para minimizar os impactos das correntes e tensões harmónicas foram criadas normas para manter os harmónicos dentro de valores considerados aceitáveis como é o caso da norma IEEE 519-1992.

Harmónicos em rectificadores

As ordens dos harmónicos de corrente produzidos por um conversor de semicondutores são chamadas de harmónicos característicos. Num rectificador de semicondutores os harmónicos característicos são dados por:

$$h = kp \pm 1$$

Em que k é um inteiro e p é o número de pulsos e h é a ordem. Para o rectificador de seis pulsos (ponte de Graëtz) estes harmónicos são: 5°, 7°, 11°, 13°, 17°, 19°, etc..

Usando um condensador no barramento de corrente contínua podem-se observar harmónicos de outra ordem chamados de harmónicos não característicos.

O valor teórico da amplitude por unidade de harmónicos característicos á entrada do rectificador é $1/h$. Na prática o valor dos harmónicos é maior porque a onda de corrente teórica na entrada é uma onda quadrada composta por uma parte positiva e negativa, cada qual de 120° eléctricos. No entanto, a corrente na entrada de um rectificador real tem um aspecto semelhante ao observado na figura 11 que depende da impedância do sistema eléctrico e transformador bem como da capacidade do condensador do barramento d.c..

Sendo assim, e conhecidos os efeitos dos harmónicos, é fácil perceber que a redução dos harmónicos é a principal razão para a utilização de rectificadores de 12 ou mais pulsos em sistemas de tracção, anulando-se assim o 5° e 7° harmónicos, que são os de maior amplitude.

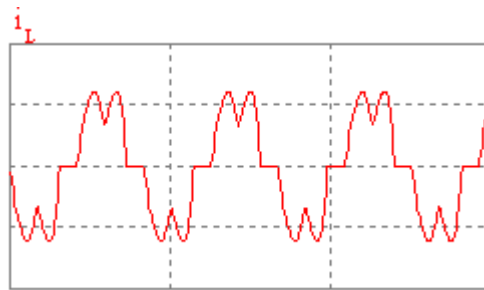


Figura 11: Corrente com harmónicos de uma fase num rectificador

2.1.2.2 Indicadores de harmónicos

Factor de potência

O factor de potência (PF) é definido por:

$$PF = \frac{P}{S};$$

em que P representa a potência activa e S a potência aparente. Distingue-se do $\cos(\varphi)$:

$$\cos(\varphi) = \frac{P_1}{S_1};$$

em que P_1 e S_1 representam a potência activa e aparente apenas da componente fundamental.

Assim um indicador da presença de harmónicos é um factor de potência medido menor do que o $\cos(\varphi)$. Este indicador é útil para sobredimensionar a fonte de alimentação de um sistema com cargas não lineares.

Factor de crista

O factor de crista é simplesmente a razão entre o valor máximo de uma tensão ou corrente e o seu valor eficaz (rms). Para um sinal sinusoidal o factor de crista é de $\sqrt{2}$, enquanto que para um sinal não sinusoidal tem um valor diferente.

O factor de crista de uma corrente de uma carga não linear é geralmente maior que o valor para uma onda sinusoidal, sendo mais um indicador da presença de harmónicos no sistema.

Taxa de distorção harmónica

A taxa de distorção harmónica ou *THD*, do inglês *Total Harmonic Distortion*, para um sinal genérico y é dada por:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1}$$

Para a corrente e tensão as fórmulas para *THD*, normalmente expressas em percentagem são:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad THDu = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1}$$

Seguem-se os valores de distorção da onda de tensão (*THDu*) e possíveis fenómenos na instalação eléctrica:

- $THDu < 5\%$ - situação normal;
- 5 a 8% - poluição harmónica significativa;
- superior a 8% - elevada poluição harmónica, risco de má operação de dispositivos.

Já para a distorção da onda de corrente (*THDi*) os valores indicativos são os seguintes:

- $THDi < 10\%$ - situação normal;
- 10 a 50% - poluição harmónica significativa com risco de aquecimento extra e necessidade de sobredimensionar cabos e fontes;
- superior a 50% - elevada poluição harmónica, risco de má operação de dispositivos e necessidade de aparelhos de atenuação de harmónicos [22].

Existem no mercado vários analisadores digitais da qualidade da energia eléctrica que permitem medir os indicadores acima referidos.

2.1.2.3 Efeitos de harmónicos

O grau com que os harmónicos podem ser tolerados num sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga ou da fonte. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, na sua concepção, assumem a existência de uma alimentação sinusoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmónicos (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

Motores e geradores

O maior efeito dos harmónicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afecta-se, assim, a sua eficiência e binário disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação sinusoidal.

Transformadores

Também neste caso existe um aumento das perdas. Harmónicos na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmónicos na corrente elevam as perdas no cobre. A elevação das perdas cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Cabos de alimentação

Devido ao efeito pelicular, que restringe a secção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido aos harmónicos de corrente.

Condensadores

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonância, podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reactância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas aos harmónicos presentes na tensão. Estas correntes provocam um maior aquecimento, reduzindo a sua vida útil.

Equipamentos electrónicos

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza o cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda

de tensão) para realizar alguma acção, distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar o seu funcionamento.

Aparelhos de medição

Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afectados, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afectam a grandeza medida.

Relés de protecção e fusíveis

Um aumento da corrente eficaz devida a harmónicos provoca um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo reduzir a sua vida útil e provocar a sua operação inadequada.

Corrente no neutro

Num sistema trifásico com neutro, os harmónicos de ordem múltipla de três não se anulam, podendo dar origem a uma corrente elevada no neutro da instalação.

2.2 Sistemas de Detecção de Falhas

No âmbito da detecção de falhas aqui apresentada, irão apenas ser consideradas as falhas dos díodos num rectificador. Estas falhas dos dispositivos semicondutores podem ser por entrada em curto-circuito ou em circuito aberto.

Existem algumas patentes de sistemas de detecção de falhas de díodos em rectificadores. Estes sistemas detectam só a falha por circuito aberto (US Patent #4713652 [2], US Patent #5225815 [5], US Patent #3806906 [6]), ou por circuito aberto e curto-circuito dos díodos (US Patent #4186391 [1], WO/2002/001698 [3], US Patent #5206801[4]).

Na detecção de falhas por circuito aberto, num dos métodos usados é comparada a tensão no barramento d.c. com um valor de *threshold* (US Patent #5225815 [5]). Quando a tensão se encontra abaixo desse *threshold* é detectada a falha de um dos díodos. Este método, que usa a amplitude do *ripple* para detectar díodos em circuito aberto, pode causar alguns problemas e dar origem a falsos alarmes pois a tensão d.c. tende a flutuar com variações na carga e/ou alimentação primária.

Noutros métodos são usados sensores indutivos como transformadores de corrente em série com cada diodo da ponte para detectar a falha de corrente nos semicondutores (US Patent #4713652 [2], US Patent #3806906 [6]). Este método implica o uso de um sensor de corrente em série com cada diodo, ou conjunto de diodos em série, o que torna o sistema caro, especialmente quando existem vários diodos em paralelo num braço.

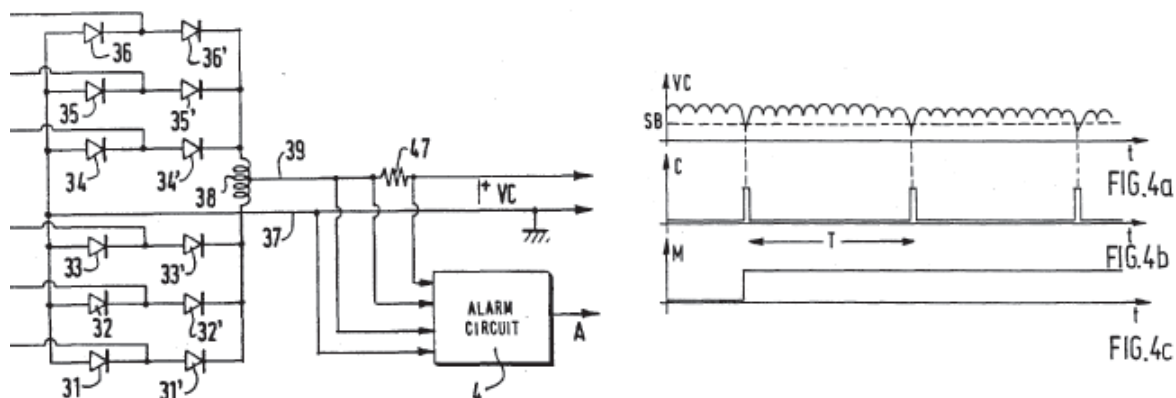


Figura 12: Detecção de circuito aberto por amplitude do ripple[5]

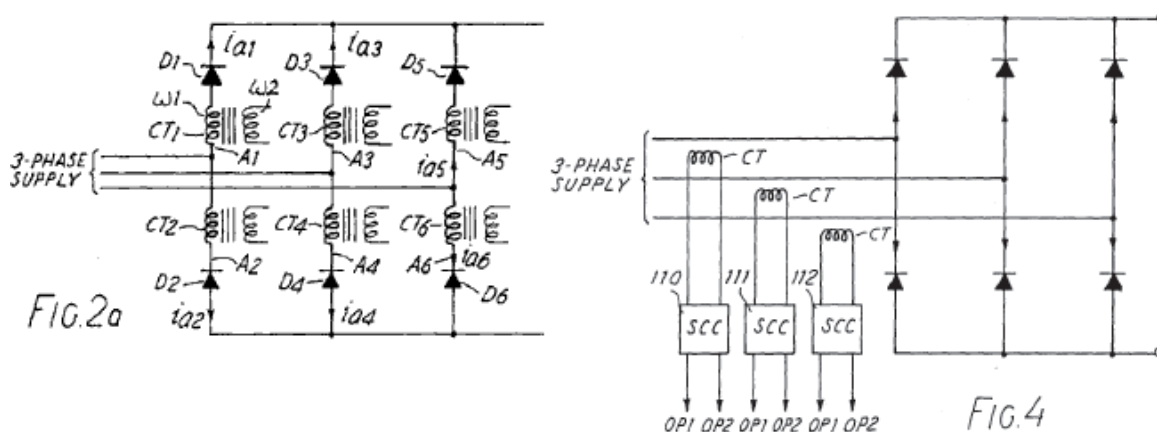


Figura 13: Detecção de circuito aberto com transformadores de corrente[2]

Os autores da patente WO/2002/001698 [3] propõem a detecção de ambas as falhas por análise da frequência da tensão contínua de saída em vez de se basear apenas na amplitude do ripple como no caso de [5]. Este método torna o sistema mais tolerante a falhas mas, á semelhança do anterior, não permite identificar qual o braço ou braços em falha, nem identificar dispositivos em falha que não causam alteração no tensão contínua, como seria o caso da falha de um diodo de um grupo de diodos em série ou paralelo.

Na detecção de ambas as falhas um dos métodos propostos é o uso de uma ponte de detecção ligada em paralelo com a ponte principal usando-se uma comparação das tensões das duas pontes para detectar falhas (US Patent #4186391 [1]). Este método é dispendioso já que era necessário o dobro dos diodos para além do circuito de detecção.

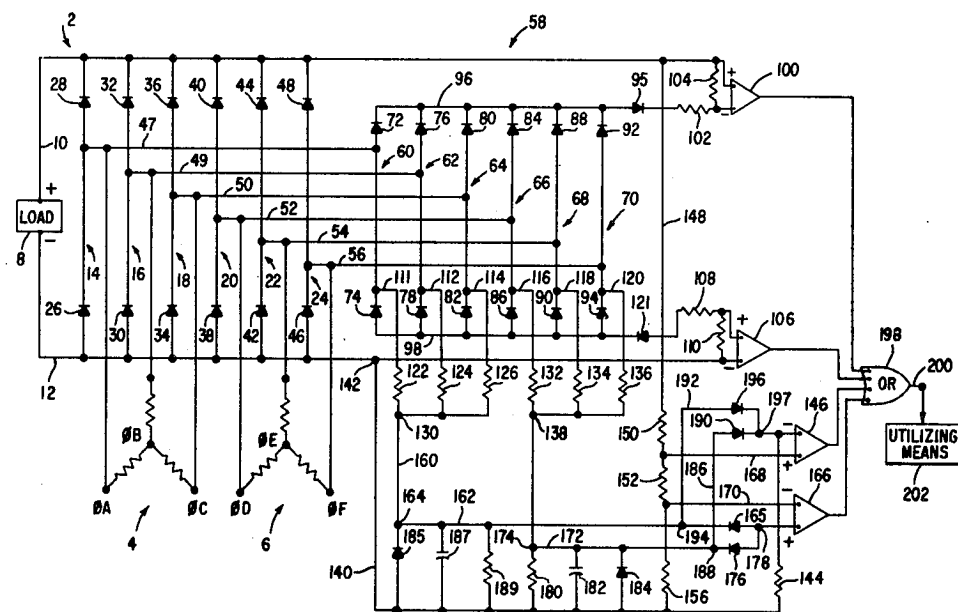


Figura 14: Detecção de falhas usando outra ponte detectora[1]

Outro método consiste em usar transformadores de corrente na alimentação da ponte (US Patent #5206801 [4]). Ao secundário dos transformadores de corrente são ligadas resistências de carga e os secundários são ligados a uma segunda ponte de detecção (de menor potência). As correntes contínuas das duas pontes são depois medidas e comparadas para detectar falhas da ponte principal.

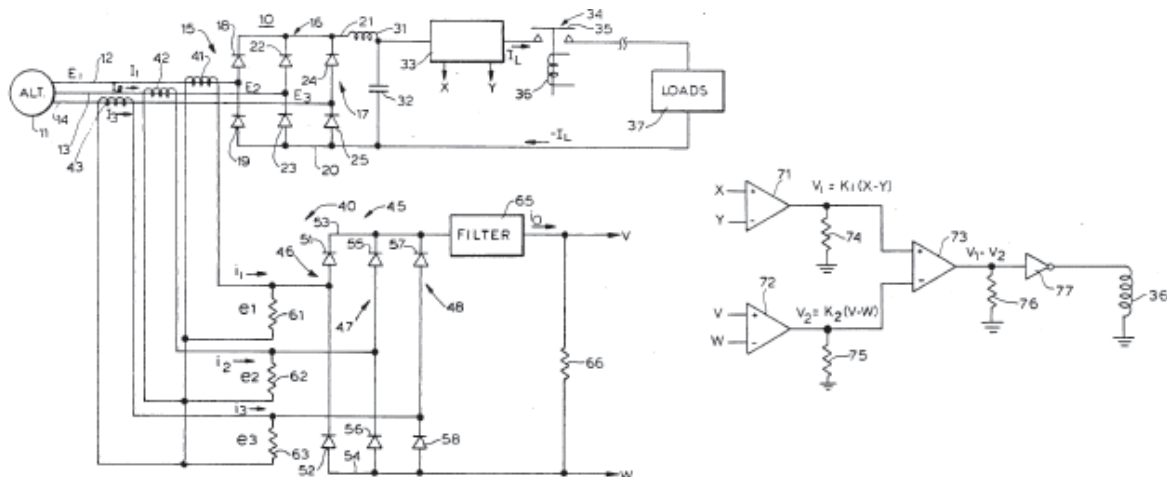


Figura 15: Detecção de falhas usando outra ponte detectora[4]

Capítulo 3

3. Trabalho do Autor

3.1 Estudo de Protecções de Rectificadores

3.1.1 Protecção contra sobretensões

Os díodos são bastante sensíveis a tensões inversas excessivas que se podem estabelecer aos seus terminais. De facto, como é analisado a seguir, há um valor máximo de tensão inversa do díodo que nunca pode ser ultrapassado (V_{RSM} símbolo para *reverse surge maximum voltage*). No entanto, os valores das tensões inversas, que se podem calcular facilmente analisando o funcionamento do rectificador, não têm em conta fenómenos de sobretensões que existem. Assim é necessário avaliar e prevenir as sobretensões que podem surgir, durante o projecto do grupo transformador-rectificador.

Podem surgir sobretensões devido a :

- corte de corrente por disjuntores rápidos no lado a.c.;
- produção e libertação de energia magnetizante do transformador;
- ligação capacitiva entre primário e secundário do transformador;
- comutações nos circuitos alimentados do lado d.c.;
- descargas atmosféricas;
- comutação dos díodos;
- fusão de fusíveis.

Para a protecção de sobretensões causadas pelo fenómeno de recuperação inversa na comutação dos díodos é geralmente usado um *snubber* RC em paralelo com cada díodo. Entre os outros casos o que dá geralmente origem a uma maior sobretensão é a libertação de energia magnetizante do transformador que pode dar origem a sobretensões da ordem de três a cinco vezes a tensão normal.

Em vazio, o disjuntor corta mal a corrente magnetizante do transformador, que é totalmente reactiva, e pode dar origem a sobretensões da ordem de 3 a 5 vezes a tensão máxima [7].

Para limitar estas sobretensões usa-se, normalmente, um condensador no barramento d.c. do rectificador, capaz de absorver uma energia reactiva equivalente á libertada pelo transformador. Este condensador protege também de sobretensões devidas á operação de cargas no barramento d.c.. O condensador leva um fusível em série e uma resistência para impedir picos de corrente, bem como outra resistência em paralelo para descarga do condensador.

Para a protecção contra sobretensões provocadas por trovoadas, pode ser usado um varistor, ou resistência não linear.

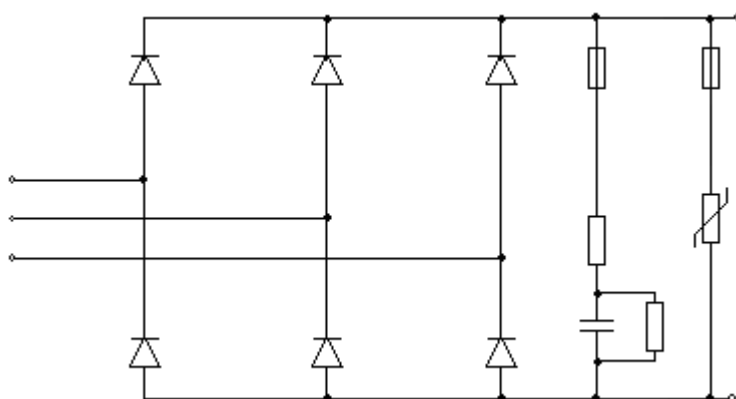


Figura 16: Protecção contra sobretensões

3.1.2 Circuitos Snubber

Os díodos usados em rectificadores funcionam como comutadores durante a sua operação. Essa comutação do estado de condução para o estado de não condução provoca picos de tensão aos terminais do díodo durante o processo de recuperação inversa (*reverse recovery*). Para evitar que estes picos de tensão danifiquem os díodos é essencial usar um circuito de protecção.

Um circuito de protecção chamado de *snubber* que é comum para um diódo de potência é o *snubber RC* da figura 17.

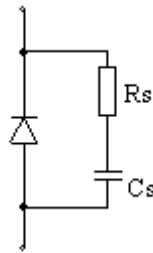


Figura 17: Snubber RC para um diódo

O fenómeno de recuperação inversa é devido á existência de uma capacidade na junção PN de um diódo. A acumulação de carga enquanto o diódo está em condução atrasa a sua saída de condução e resulta numa corrente no sentido inverso do da condução do diódo. Isto provoca uma sobretensão que pode ser atenuada recorrendo a um circuito RC, conforme a figura seguinte.

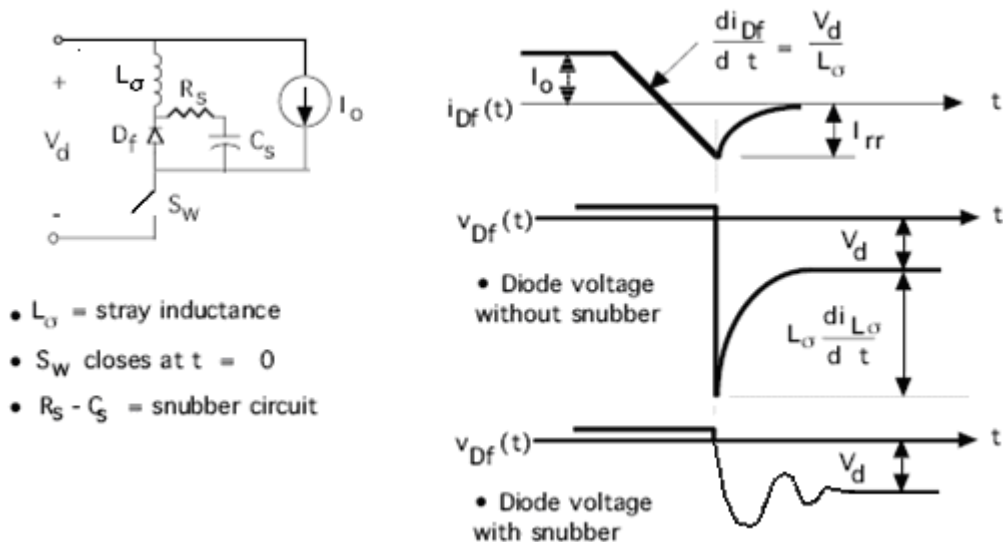


Figura 18: Efeitos de um snubber RC para um diódo [9]

3.1.3 Fusíveis

Para proteger os diodos dos efeitos térmicos de correntes de curto-circuito é usado um fusível em série com o diódo (ou com os diodos no caso de vários em série por braço).

Fusíveis de acção rápida são normalmente usados para proteger os dispositivos semicondutores dos efeitos térmicos de correntes de curto-circuito. Ao aumentar a corrente de falha o fusível abre o circuito e extingue a corrente de falha em poucos milissegundos.

Os fusíveis podem ser colocados nas fases de alimentação (figura 19a) de um rectificador ou em série com cada semiconductor (figura 19b). Esta última configuração permite uma maior coordenação entre o dispositivo semiconductor e o seu fusível.

Quando a corrente de falha aumenta, a temperatura do fusível aumenta até atingir a temperatura de fusão do elemento fusível quando este se derrete e surge um arco eléctrico. Devido ao arco, a impedância do fusível aumenta, reduzindo a corrente mas dando origem a uma tensão. O tempo total de actuação de um fusível é a soma do tempo de fusão com o tempo de duração do arco eléctrico. As curvas de corrente *v.s.* tempo do fusível e semiconductor podem ser usadas para escolher o fusível adequado a usar. Nos rectificadores de maior potência é comum usar uma protecção por fusível para correntes de curto-circuito e uma protecção por disjuntor térmico para outros regimes de sobrecarga, podendo-se usar também uma protecção por fusível para todos os regimes de sobrecarga conforme a figura 20a) para rectificadores de potência mais baixa.

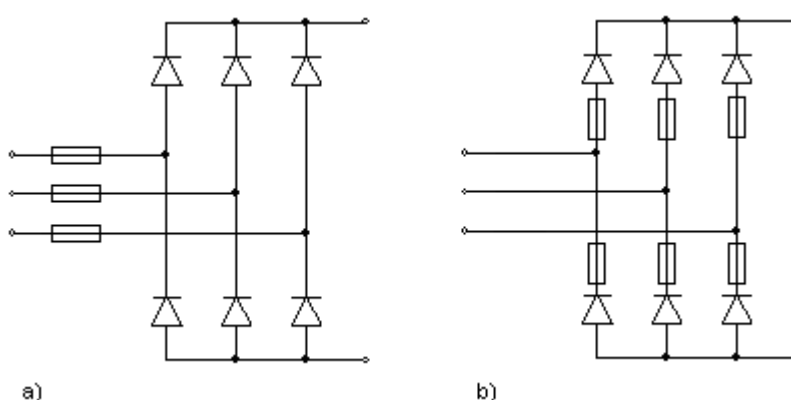


Figura 19: Colocação dos fusíveis

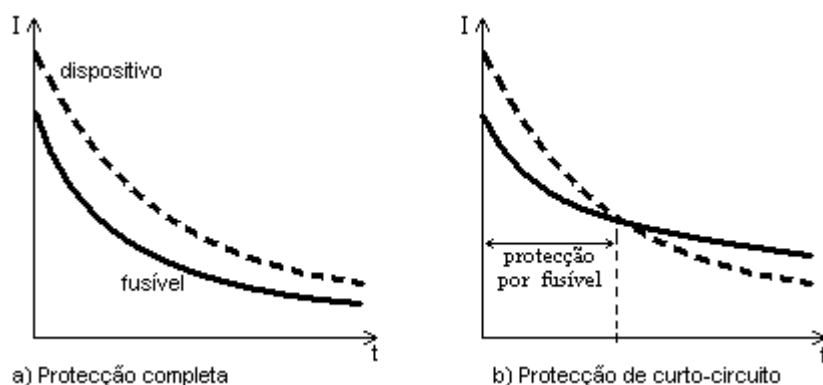


Figura 20: Característica corrente-tempo de fusível e dispositivo

Se R for a resistência do circuito de falha e i a corrente instantânea do início da falha até à extinção do arco eléctrico no fusível, a energia fornecida ao circuito é dada por:

$$W = \int Ri^2 dt$$

Desde que R seja constante, o valor de $i^2 t$ é proporcional á energia fornecida ao circuito que é responsável pela fusão do fusível. Este valor de $i^2 t$ é fornecido pelos fabricantes de fusíveis e também pelos fabricantes de díodos.

Para seleccionar um fusível é necessário ter em especial atenção os seguintes aspectos:

- 1) O fusível deve suportar em contínuo a corrente nominal do circuito;
- 2) O valor $i^2 t$ do fusível deve ser menor que o valor $i^2 t$ do semiconductor;
- 3) O fusível deve suportar a tensão estabelecida depois de se fundir;
- 4) O pico de tensão de arco do fusível deve ser menor que o pico máximo de tensão suportado pelo dispositivo semiconductor.

De facto para dimensionar correctamente fusíveis para rectificadores de tracção, em especial os que têm vários díodos em paralelo por braço, há que ter em conta outros aspectos como a coordenação entre o fusível e o disjuntor, normalmente instalado no lado a.c., a coordenação entre o fusível no braço em falha com os outros fusíveis em série com díodos “saudáveis” e vários factores de *derating* que incluem a frequência da corrente, a ligação dos fusíveis ao barramento e a temperatura ambiente.

No mercado existem também bases ou suportes para fusíveis com um microcontacto para detecção de fusíveis fundidos por ligação a um sistema de controlo e/ou supervisão.

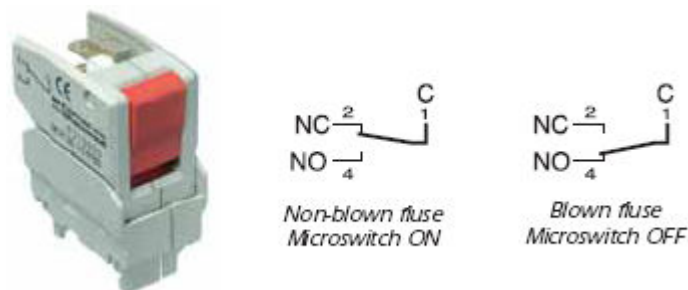


Figura 21: Base para fusível com microcontacto [12]

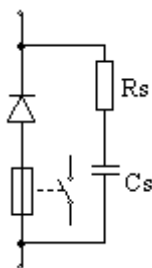


Figura 22: Díodo com fusível com microcontacto e snubber RC

3.1.4 Ligação em série e paralelo de díodos

Para alguns rectificadores com requisitos de correntes e/ou tensões elevados e que ultrapassam os limites dos díodos disponíveis, podem-se usar associações de díodos em série e em paralelo.

Ligar díodos em série vai permitir ao rectificador uma maior capacidade de tensão, no entanto é preciso garantir que os díodos são equivalentes em termos das suas propriedades de recuperação inversa. De modo contrário durante o modo de recuperação inversa podem existir desequilíbrios entre as tensões inversas dos díodos. Para além disso alguns díodos podem recuperar mais rapidamente do fenómeno repartindo-se a tensão inversa pelos restantes.

Então é necessário garantir que os díodos estão balanceados em termos de distribuição da tensão inversa que se estabelece quando a associação de díodos não está em condução. Isso consegue-se ligando resistências de igual valor em paralelo com os díodos conforme a figura 23.

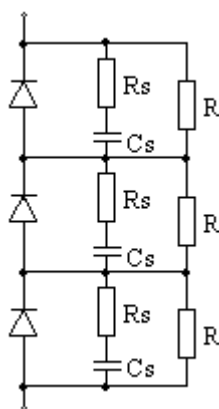


Figura 23: Díodos em série com snubber RC e resistência de balanço de tensões R

Se um diodo não é suficiente para conduzir a corrente necessária podem-se também usar diodos em paralelo.

Neste caso, á semelhança do anterior, é preciso garantir que os diodos são compatíveis, aqui, em termos da queda de tensão em condução. Para isso escolhem-se diodos com a mesma tensão de *threshold* que é um dado fornecido pelos fabricantes (V_{TO}) e representa a tensão a partir da qual o diodo conduz uma corrente significativa no sentido directo. Também é importante garantir que os diodos estão montados em dissipadores semelhantes e que arrefecem de modo idêntico já que a temperatura afecta as características de condução directa do diodo, aumentando a sua condutividade.

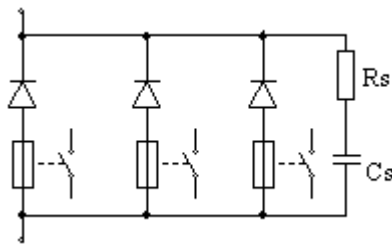


Figura 24: Diodos em paralelo com fusível com microcontacto e snubber

3.2 Estudo de Falhas em Rectificadores

3.2.1 Falhas de díodos

Os parâmetros mais importantes de um diodo e fornecidos por todas as *datasheets* de fabricantes estão resumidos na tabela seguinte.

Tabela 2: Parâmetros relevantes de um diodo

Parâmetro	Descrição
V_F	Queda de tensão máxima em condução – valor geralmente entre 0,7V e 1,5V.
V_{RRM}	Tensão repetitiva inversa máxima – pico de tensão inversa que se pode repetir sem danificar o diodo.
V_{RSM}	Tensão não repetitiva inversa máxima – pico de tensão único.
$V_{R(rms)}$	Tensão inversa eficaz – valor eficaz máximo da tensão inversa.
I_F	Corrente contínua em condução – máximo valor médio da corrente em sentido directo.
I_{FSM}	Pico de corrente directa não repetitiva – máximo valor de pico da corrente no sentido directo.

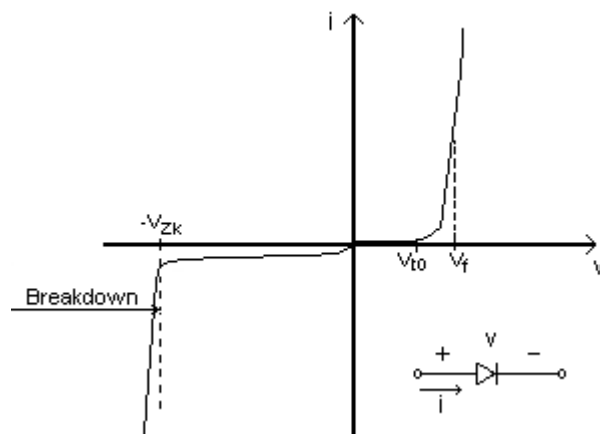


Figura 25: Característica i-v de um diodo

As causas mais comuns de falha de díodos são a excessiva corrente directa e tensão inversa acima da tensão de ruptura (*reverse breakdown*). Quando os valores de correntes e tensões resumidos na tabela anterior e especificados na folha de características do componente são ultrapassados corre-se o risco de provocar uma falha no díodo.

As falhas mais comuns e a sua frequência relativa de ocorrência em díodos semicondutores são as seguintes.

Tabela 3: Percentagem de falhas por tipo de díodos [19]

Tipo de díodos	Tipo de falha		
	curto-circuito	circuito aberto	alteração de parâmetros
Uso geral	49%	36%	15%
Rectificadores	51%	29%	20%
Sinal	18%	24%	58%

3.2.2 Curto-circuito externo

No caso de curto-circuito no barramento de corrente contínua do rectificador (ver figura 26), os díodos e os enrolamentos do transformador são percorridos por correntes cuja intensidade é um múltiplo das correntes em serviço normal. É necessário saber avaliar essas correntes para o projecto dos rectificadores de modo a saber se os transformadores e condutores têm as características térmicas para aguentá-las, bem como para dimensionar os díodos e até decidir sobre a configuração do conversor (existência ou não de díodos em paralelo para divisão de corrente). Para além disso é necessário saber a intensidade das correntes de curto-circuito para dimensionar as protecções do conversor.

O cálculo das correntes de curto-circuito a seguir apresentado é feito para uma montagem em ponte de Graëtz (ver figura 26). Este esquema de montagem de rectificadores é muito usado em rectificadores de potência como é o caso dos rectificadores de tracção.

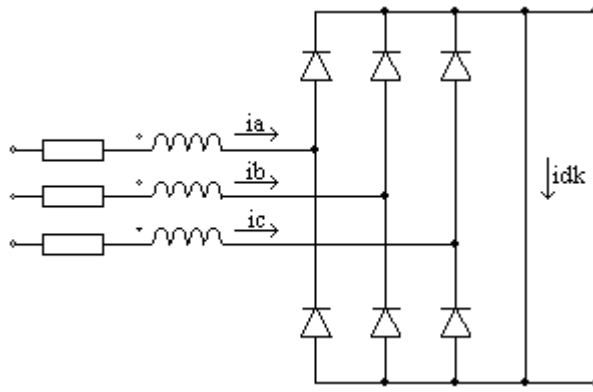


Figura 26: Esquema de um curto-circuito externo

Para cálculo das correntes de curto-circuito assumem-se as seguintes hipóteses:

- Consideram-se os díodos ideais (impedância nula no sentido directo e infinita no sentido inverso).
- As impedâncias do transformador podem ser referidas ao primário do transformador.
- A impedância do circuito a montante do transformador é considerada nula.
- A impedância do circuito a jusante do transformador é incluída na impedância considerada para o transformador.
- A tensão de alimentação é constante.

Um curto-circuito no barramento d.c. (barramento de corrente contínua) corresponde, visto do primário, a um curto-circuito total dos secundários do transformador.

O curto-circuito é caracterizado por duas fases distintas: uma fase inicial chamada de regime assimétrico e uma fase permanente chamada de regime simétrico.

A corrente de curto-circuito possui então uma componente contínua e uma componente alternada segundo a seguinte fórmula para uma fase:

$$i = I_{vKm} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (1)$$

em que:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$$

$\alpha \rightarrow$ ângulo de falha

X, L e R representam, respectivamente, a reactância, a indutância e resistência do transformador e I_{vKm} é o valor máximo da corrente em regime simétrico do lado do rectificador e para o caso de uma ponte Graëtz é calculado por Raoul Mascarin [7] e dado por:

$$I_{vKm} = 1,15 \frac{I_d}{e_z}, \text{ em que:}$$

I_d - valor nominal da corrente contínua

e_z – tensão de curto-circuito total

Como se pode ver pela fórmula 1, a componente contínua depende do instante em que ocorre o curto-circuito externo e da impedância sendo os dois casos extremos representados na figura 27 na qual:

a) $\alpha = 0$, regime assimétrico

b) $\alpha = \varphi = \frac{\pi}{2}$, regime simétrico

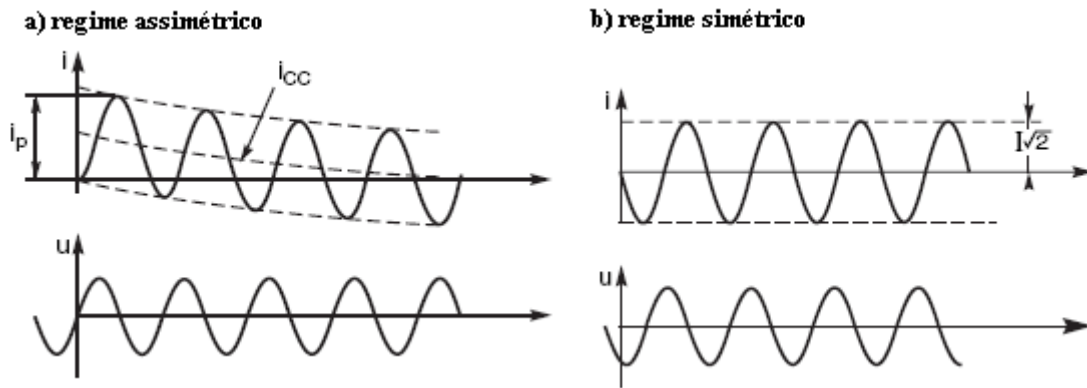


Figura 27: Corrente de curto-circuito - regime assimétrico e simétrico [11]

3.2.2.1 Corrente no primário do transformador

Sendo e_z a tensão de curto-circuito que faz circular no primário do transformador a corrente nominal de alimentação (I_L) então (índice K para curto-circuito e m para máximo):

$$I_{LK} = \frac{I_L}{e_z} \quad \text{valor eficaz}$$

$$I_{LKm} = \frac{I_{Lm}}{e_z} \quad \text{valor máximo}$$

3.2.2.2 Corrente na saída do transformador

A corrente na saída do transformador, no lado dos díodos ou válvulas (índice v para o lado das válvulas), e para a ponte Graëtz é dada por:

$$I_{vK} = \frac{I_d}{e_z} \left(\frac{I_L}{I_d} \right) \cong 0,82 \frac{I_d}{e_z} \quad \text{valor eficaz}$$

$$I_{vKm} = \frac{I_d \sqrt{2}}{e_z} \left(\frac{I_L}{I_d} \right) \cong 1,15 \frac{I_d}{e_z} \quad \text{valor máximo}$$

(regime simétrico)

No entanto, logo após a ocorrência do curto-circuito e em regime assimétrico aplica-se:

$$i = I_{vKm} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

cujo valor máximo é quando o circuito é puramente indutivo e o curto-circuito se dá no instante em que a tensão de uma das fases passa por zero ($\alpha = 0$, $R = 0 \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{2}$), aí:

$$i = 2 I_{vKm} \sin(\omega t)$$

$$\hat{I}_m = 2 I_{vKm}$$

O valor máximo para um transformador com indutância X e resistência R será o valor máximo de:

$$i = I_{vKm} \sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-t \cdot \tan^{-1}(\varphi)}$$

Sendo o ângulo φ uma constante para o circuito em questão e definida por:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$$

Este valor tem um cálculo laborioso pelo que é usada uma curva de conversão que relaciona o coeficiente k $\left(k = \frac{\hat{I}_m}{I_{vKm}} \right)$ com o co-seno do ângulo φ .

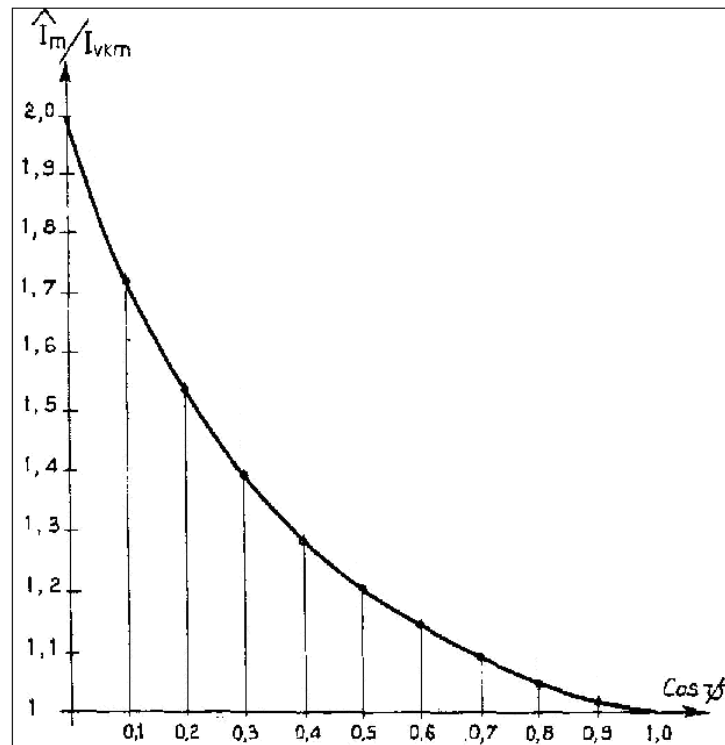


Figura 28: Valores de pico de corrente assimétrica [7]

3.2.2.3 Exemplo de Cálculo

Cálculo e simulação de um curto-circuito externo para um retificador em ponte de Graëtz.

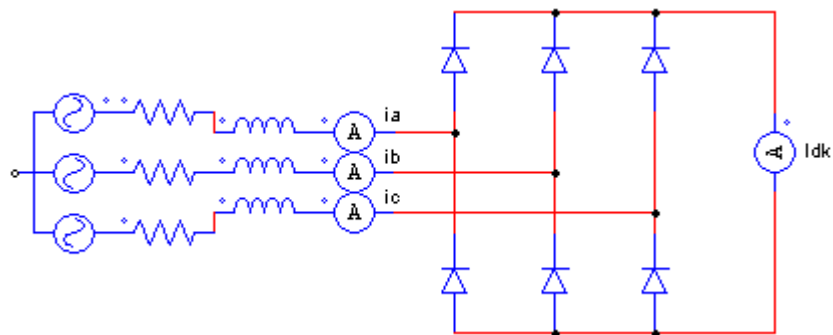


Figura 29: Circuito de simulação de curto-circuito externo

Neste circuito de simula-se o curto-circuito externo de um retificador com as seguintes características:

- Tensão entre fases: $U_{vo} = 1300V_{ef}$, frequência: $f=60Hz$;
- Corrente d.c. nominal: $I_d = 1000A$;
- Tensão de curto-circuito do transformador 10%: $e_z=0,10$;

- Circuito com relação: $\frac{X}{R} = \tan(75^\circ)$;

Com estes dados chega-se ao valor da resistência e indutância para cada fase de alimentação do transformador. Valores que são usados na simulação.

$$\begin{cases} \frac{X}{R} = \tan(75^\circ) \\ Z = \sqrt{X^2 + R^2} = e_z \frac{3U_{vo}}{2\sqrt{3}I_d} = 0,1 \frac{3/2 * 1300}{\sqrt{3} * 1000} \end{cases} = \begin{cases} \frac{X}{R} = 3,732 \\ 3,864R = 0,1126 \end{cases} =$$

$$= \begin{cases} X = 2\pi * 60.L = 0,1086 \\ R = 0,0291 \end{cases} = \begin{cases} L = 0,2884 mH \\ R = 0,0291 \Omega \end{cases}$$

$$\cos(75^\circ) = 0,259 \Rightarrow \frac{\hat{I}_m}{I_{vkm}} = 1,45 \quad \text{por análise da figura 28.}$$

O valor de pico de corrente assimétrica é, neste circuito, de cerca de 1,45 vezes o pico de corrente de curto-circuito simétrica.

Cálculo de correntes de curto-circuito:

De seguida usam-se as fórmulas normalizadas [IEC146-1-1] para o cálculo de correntes de curto-circuito numa ponte de Graëtz (montagem nº 10 IEC):

$$\begin{aligned} \varphi &= \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) = 75^\circ \\ e_z &= 10\% \\ I_d &= 1000 A \\ I_{vK} &= 0,82 \frac{I_d}{e_z} = 8200 A \\ I_{vKm} &= 1,15 \frac{I_d}{e_z} = 9430 A \\ I_m &= 1,45 I_{vkm} = 13674 A \end{aligned}$$

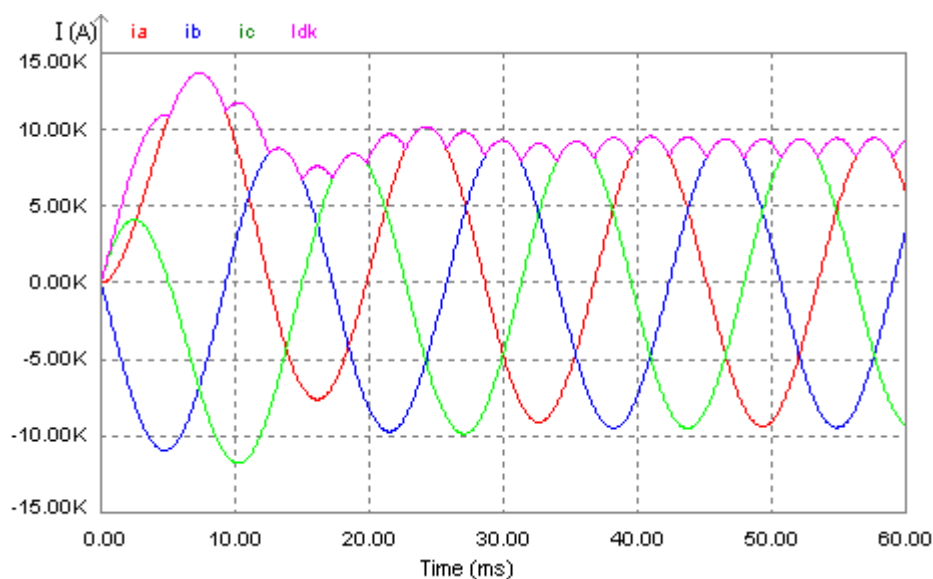
Simulação do circuito da figura 29:

Figura 30: Formas de onda de um curto-circuito externo com $X/R=\tan(75^\circ)$

Pode-se ver na simulação a confirmação dos resultados obtidos com as fórmulas. Note-se que foi simulado o pior caso em termos de pico assimétrico de corrente que se obtém quando uma das tensões de alimentação passa por zero.

3.2.3 Curto-circuito interno

Chama-se curto-circuito interno quando um braço da montagem fica em curto-circuito devido á falha do diodo ou díodos no caso de existirem vários em série.

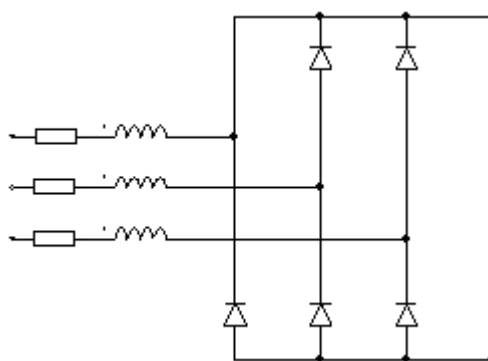


Figura 31: Esquema de um curto-circuito interno

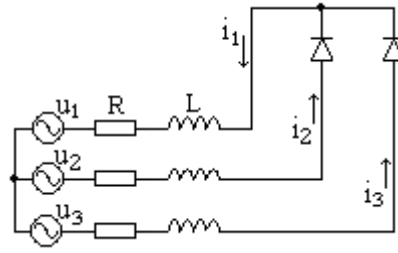


Figura 32: Circuito equivalente para curto-circuito interno

$$\begin{cases} -Ri_1 - Ri_2 - L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_2}{dt} + u_{21} = 0 \\ -Ri_1 - Ri_3 - L \frac{di_1}{dt} - L \frac{di_3}{dt} + u_{31} = 0 \\ i_1 = i_2 + i_3 \end{cases}$$

Através das fórmulas acima, demonstra-se em [7] que o maior pico de corrente se dá no caso de um circuito puramente indutivo ($R=0$) no braço em curto-circuito e que equivale a:

$$I_{1m} = 2,37 \frac{V_m}{\omega L}, \text{ no primeiro pico}$$

$$I_{1m} = 3 \frac{V_m}{\omega L}, \text{ em regime permanente}$$

$$V_m \rightarrow \text{amplitude da tensão de fase}$$

Então, em relação á corrente máxima no caso de um curto-circuito externo, o primeiro pico pode ser cerca de 1,2 vezes superior e usa-se a regra prática:

$$I_{1m} = 1,2 I_m$$

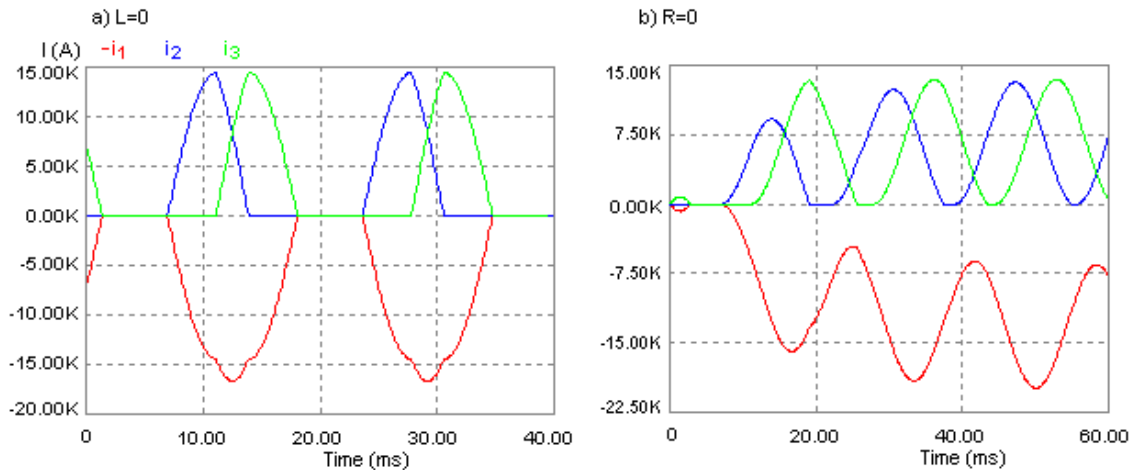


Figura 33: Formas de onda de um curto-circuito interno

Para o circuito usado na simulação de um curto-circuito externo (figura 29, em que $X/R=\tan(75^\circ)$) verifica-se que os picos de corrente são neste caso mais elevados no braço em defeito mas inferiores nos braços sem defeito. De facto aplicando a regra prática de 1,2 vezes o pico de corrente assimétrica obtida no curto-circuito externo, têm-se $I_{Im}=16400$ o que dá um majorante do primeiro pico de corrente.

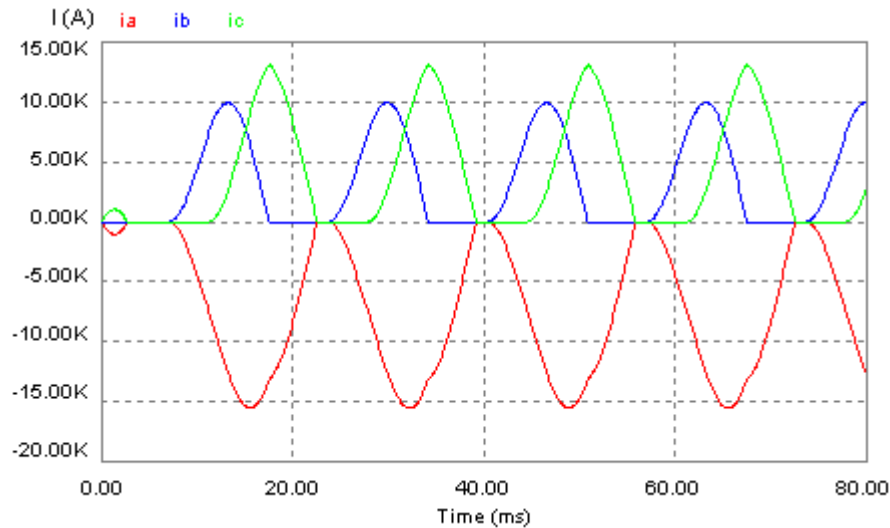


Figura 34: Formas de onda de um curto-circuito interno com $X/R=\tan(75^\circ)$

3.2.4 Conclusões sobre curto-circuitos

O valor da corrente de curto-circuito interno nos braços sem defeito não ultrapassa o valor para o caso de um curto-circuito externo, no entanto, para o braço em defeito a corrente pode ultrapassar o valor em 20%. Para dimensionar os díodos em termos da corrente máxima que devem aguentar deve-se usar o valor máximo calculado para o braço em defeito no caso de um curto-circuito interno.

3.2.5 Circuito aberto de díodos ou braços

Um circuito aberto de um díodo de um braço pode ter duas consequências: pode dar origem a um braço em circuito aberto, se não existirem mais díodos em paralelo, ou pode dar origem a um aumento de corrente nos díodos que existam em paralelo com o mesmo.

O primeiro caso, em que um braço entra em circuito aberto, é grave dado que não dá origem a uma corrente de falha e o rectificador pode continuar em funcionamento caso não exista protecção específica para este caso. No entanto a tensão d.c. irá apresentar maior *ripple* e irão existir harmónicos de corrente de amplitude muito superior.

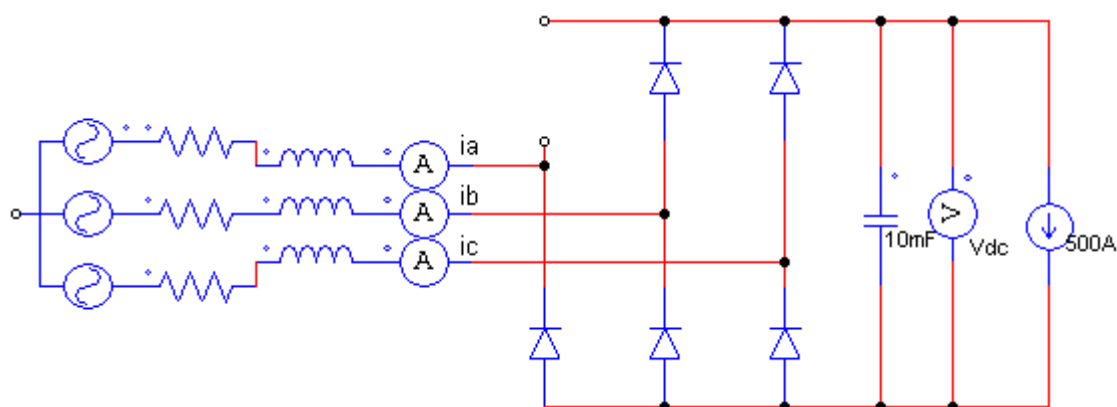


Figura 35: Circuito de simulação de braço em circuito aberto

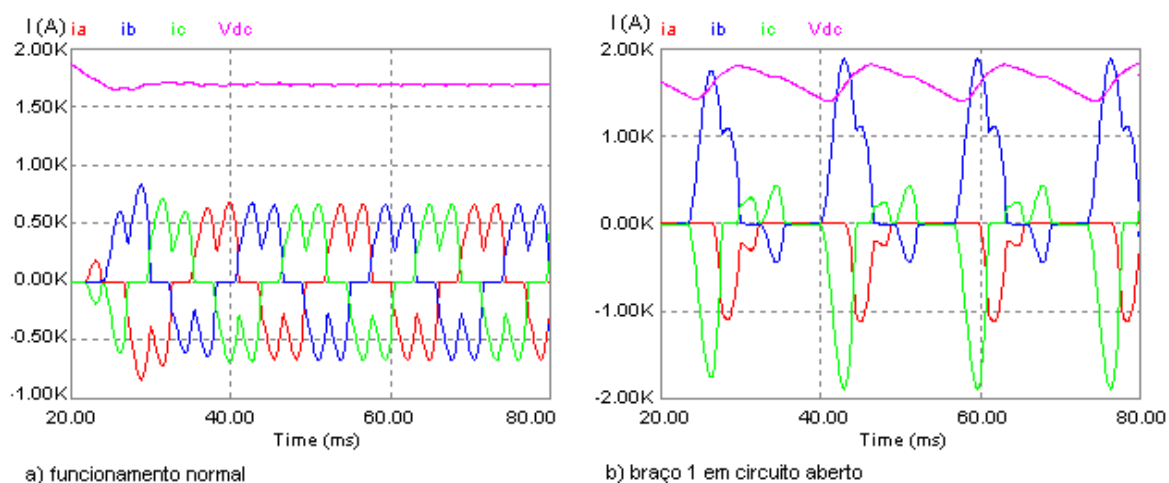


Figura 36: Diferença entre funcionamento normal e com um circuito aberto

Pode-se ver na figura acima que as formas de onda de corrente e tensão, no caso do funcionamento com um braço em circuito aberto, têm um conteúdo harmónico muito superior ao que teriam com o rectificador em funcionamento normal.

3.3 Sistema de detecção de falhas baseado em opto-emissores

3.3.1 Rectificador

Como já foi referido, este projecto inseriu-se no âmbito de uma renovação de rectificadores de tracção existentes numa linha da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. Este projecto foi encomendado à EFACEC do Brasil que por sua vez encomendou à EFACEC Sistemas de Electrónica, S.A. a realização do sistema de detecção e sinalização de avarias nos díodos.

O grupo transformador-rectificador é composto por um transformador de relação de transformação 88000 / 2x6x2450 V. O secundário tem dois conjuntos (em fase) de seis fases com desfasamento de 60° entre si, dando origem a dois rectificadores hexafásicos simples em paralelo.

O rectificador tem tensão d.c. nominal de 3000V e potência nominal de 3000KW.

A tensão de alimentação tem frequência de 60Hz.

Está dividido por dois armários: um que contém os braços 1,2,3,4,5 e 6 e o outro os restantes.

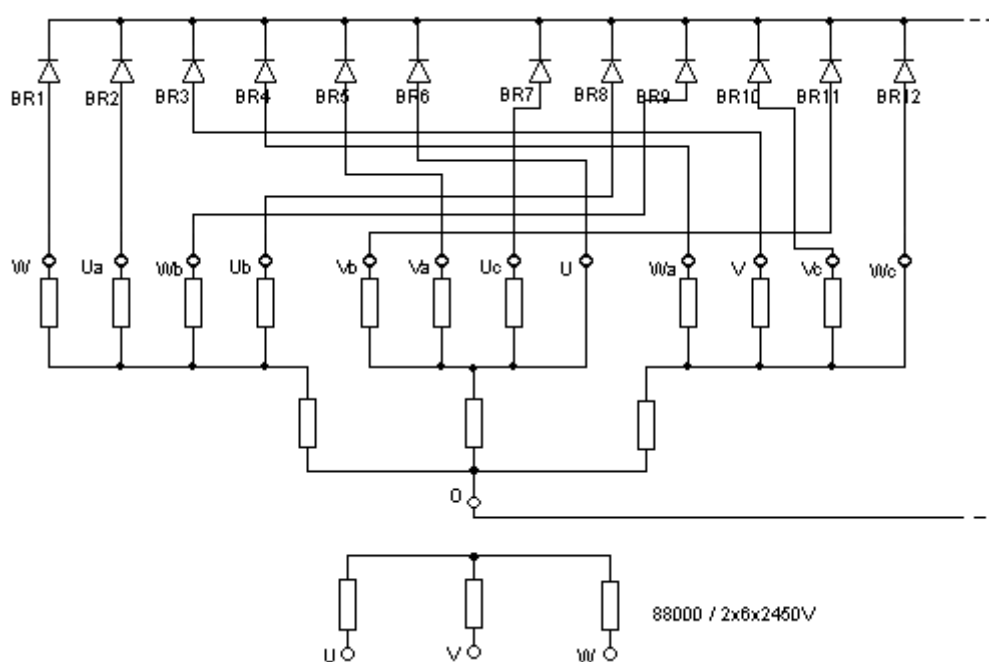


Figura 37: Esquema do grupo transformador-rectificador

Cada braço deste rectificador é composto por cinco díodos em série conforme a figura seguinte. Estes díodos têm em paralelo um snubber RC e resistências para divisão da tensão inversa pelos díodos.

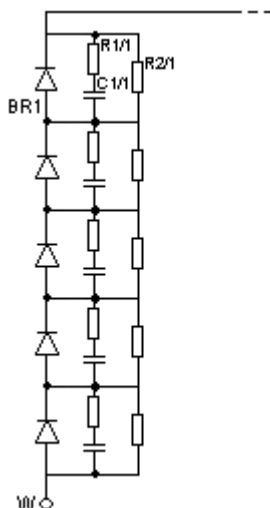


Figura 38: Composição de um braço

3.3.2 Requisitos

Para a implementação nos rectificadores existentes no Brasil os requisitos foram:

- Detecção e sinalização de díodos em curto-circuito
- Alarme no caso de falha de um díodo
 - Sinalização do braço da ocorrência. Saída livre de potencial para accionar relés de baixo consumo de 24Vd.c..
- Disparo em caso de falha de dois ou mais díodos. Saída livre de potencial para accionar relés de baixo consumo de 24Vd.c..

Para além destes requisitos foi decidido desenvolver um sistema que também fosse capaz de detectar a falha por entrada em circuito aberto dos díodos.

3.3.3 Projecto

3.3.3.1 Simulação do funcionamento do rectificador

Para o estudo das correntes e tensões estabelecidas em funcionamento normal e com dispositivos em falha, usou-se o seguinte circuito num software de simulação.

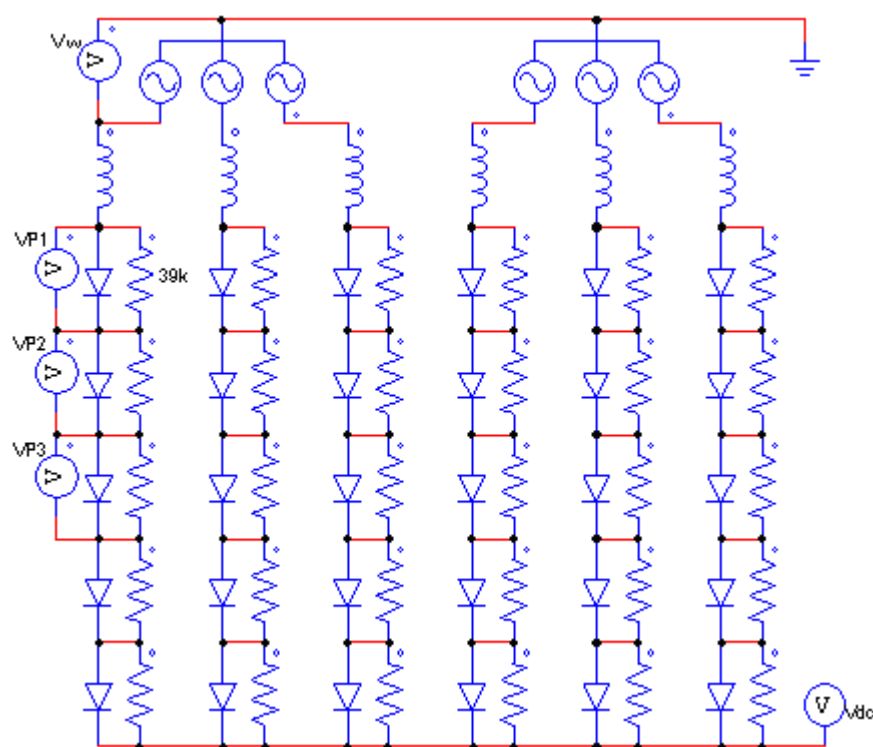


Figura 39: Circuito para simulação de funcionamento do rectificador

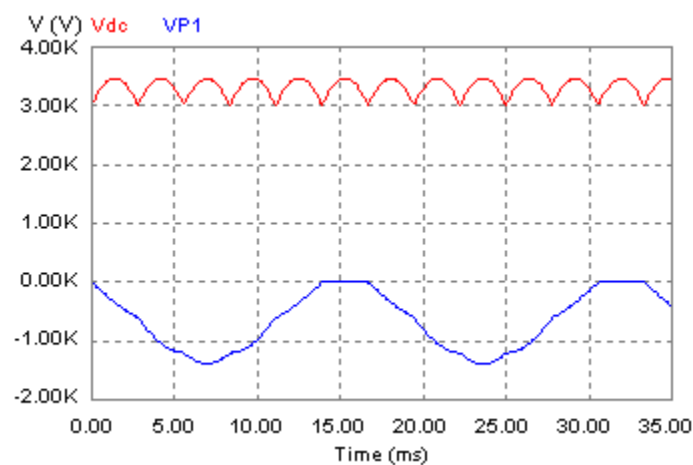


Figura 40: Tensões de funcionamento normal

Na figura 40 pode-se ver a tensão d.c. e a tensão inversa sobre o diodo 1 do braço 1 que é igual a um quinto da tensão inversa sobre o braço devido á acção das resistências de equilíbrio de tensão.

3.3.3.2 Estudo das características do rectificador

Demonstra-se que para esta montagem o valor da tensão contínua ideal em vazio e tensão inversa sobre um braço são os seguintes:

Tensão contínua ideal em vazio (U_{di0}):

$$U_{di0} = U_{v0} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{q}{\pi} = 2450 \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{6}{\pi} \cong 3310V, \quad (1)$$

$q = 6 \rightarrow \text{índice de comutação}$

Tensão inversa sobre um braço(U_i):

$$U_{im} = 2,09.U_{dio} = 2,09 * 3310 = 6918V \quad (\text{valor máximo}) \quad (2)$$

$$U_i = 1,24.U_{dio} = 1,24 * 3310 = 4104V \quad (\text{valor eficaz}) \quad (3)$$

Demonstração:

A tensão contínua ideal em vazio não é mais do que o valor médio da tensão d.c. em vazio ignorando as quedas de tensão dos diodos.

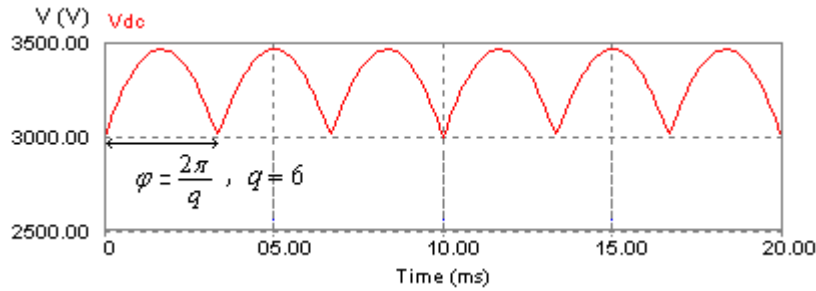


Figura 41: Tensão d.c. ideal não filtrada de um rectificador hexafásico

Valor médio de uma sinusóide entre $-\frac{\varphi}{2}$ e $\frac{\varphi}{2}$:

$$V_{med} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} V_m \cos x \, dx = \frac{V_m}{2\pi} (\sin x_2 - \sin x_1), \quad x_1 = -\frac{\varphi}{2}, \quad x_2 = \frac{\varphi}{2}$$

$$\Leftrightarrow V_{med} = \frac{V_m}{\pi} \sin \frac{\varphi}{2}$$

O valor médio tem de ser multiplicado pelo índice de comutação q ficando:

$$U_{dio} = V_m \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q}$$

Aplicando $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ e reparando que $V \sin \frac{\pi}{q} = \frac{U_{vo}}{2}$ sendo U_{vo} o valor eficaz da tensão simples, a expressão fica agora:

$$U_{dio} = U_{vo} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{q}{\pi}$$

A fórmula para a tensão inversa sobre um braço no período de não condução vem da observação que a tensão inversa máxima sobre um diodo é o dobro da tensão máxima d.c. no caso de um rectificador alimentado por um sistema com um número par de fases:

$$V_m = \frac{2\pi}{6} U_{dio}$$

$$U_{im} = 2V_m \Rightarrow U_{im} = 2,09U_{dio}$$

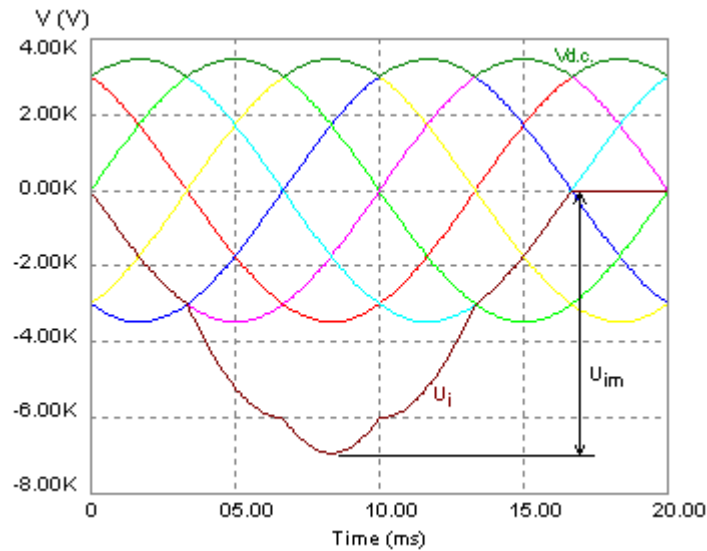


Figura 42: Tensão inversa sobre um braço do rectificador hexafásico

3.3.3.3 Detecção de curto-circuito baseada em opto-emissores

O método desenvolvido para a detecção de falhas usa a tensão inversa que se estabelece aos terminais de cada diodo quando não estão em condução. Para isso usam-se opto-emissores em paralelo com cada diodo. Assim, enquanto os diodos estiverem em funcionamento normal, há uma tensão inversa que provoca uma corrente que acende os leds dos opto-emissores. Se algum dos diodos entra em curto-circuito deixa de haver tensão aos seus terminais e os opto-emissores permanecem apagados.

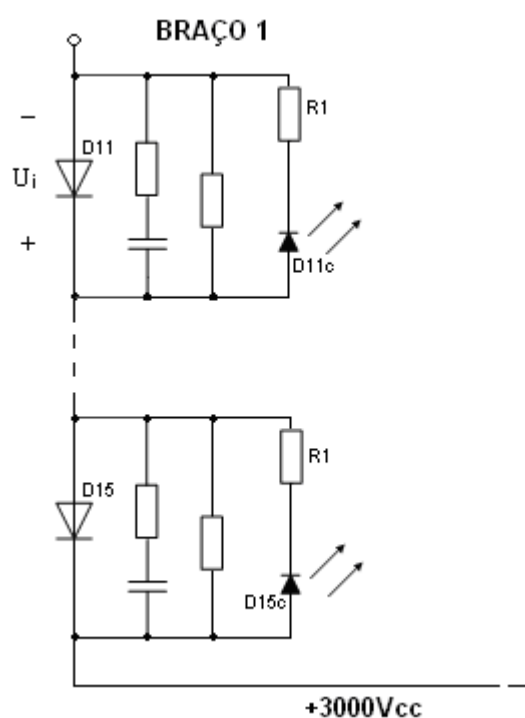


Figura 43: Configuração dos opto-emissores

É necessário dimensionar a resistência de limitação de corrente para os opto-emissores (R_1) de modo a não ultrapassar os limites de funcionamento dos mesmos. Nesta análise é fundamental notar que com diodos em curto-circuito num braço, a tensão inversa vai ser dividida apenas pelos diodos em funcionamento. Assim o pior caso ocorre quando temos dois diodos em curto-circuito num mesmo braço, embora só ocorra até o rectificador ser posto fora de serviço.

Dimensionamento de R₁:

Para os opto-emissores usaram-se uns de referência SFH756V com as seguintes características de corrente directa máxima:

$$I_{Fm} = 30mA, T_{amb} = 55^{\circ}C \quad (\text{valor máximo em contínuo})$$

$$I_{Fsm} = 1A \quad (\text{valor de pico})$$

Tensão inversa sobre um diódo em funcionamento normal:

$$U_{im_d} = \frac{6918}{5} \cong 1384V \quad (\text{valor máximo})$$

$$U_{i_d} = \frac{4104}{5} \cong 821V \quad (\text{valor eficaz})$$

1) Para o opto-emissor em anti-paralelo, sinalizador de curto-circuito:

1.1) Tensão inversa sobre um diódo com outro diódo do mesmo braço em curto-circuito:

$$U_{im_d_1.1} = \frac{6918}{4} \cong 1730V \quad (1.1)$$

$$U_{i_d_1.1} = \frac{4104}{4} \cong 1026V$$

1.2) Tensão inversa sobre um diódo com dois outros diódos do mesmo braço em curto-circuito :

$$U_{im_d_1.2} = \frac{6918}{3} \cong 2306V \quad (1.2)$$

$$U_{i_d_1.2} = \frac{4104}{3} \cong 1368V$$

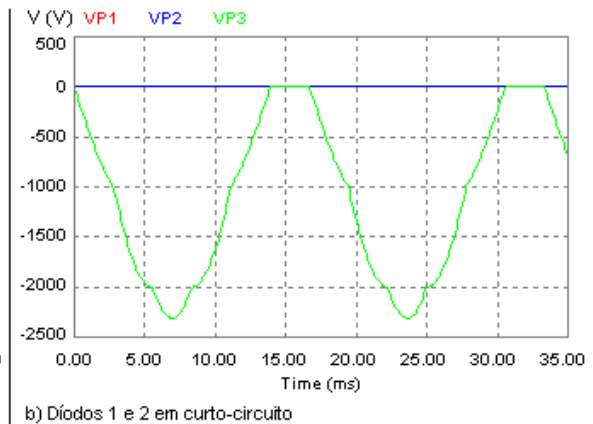
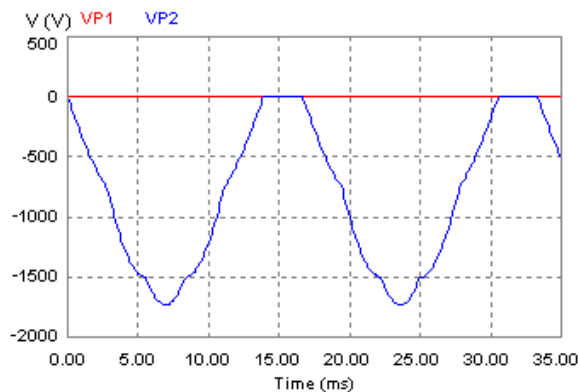


Figura 44: Formas de tensão inversa sobre diódos em funcionamento

O caso no qual a tensão sobre a resistência R_I e os opto-emissores é maior é o caso descrito em 1.2) em que a tensão máxima é de 2306V. Daí calcula-se o valor mínimo da resistência R_I :

$$R_I \geq \frac{2306}{0.030} \cong 76870\Omega$$

$$R_I = 78K\Omega \quad (39K\Omega + 39K\Omega)$$

Para o cálculo da potência mínima de R_I usa-se o valor eficaz:

$$P_{R1} \geq \frac{1368^2}{78000} \cong 24W$$

$$P_{R1} \geq 25W$$

Análise da corrente nos opto-emissores:

Corrente máxima nos opto-emissores em funcionamento normal:

$$I_{Fm_normal} = \frac{1384}{78000} \cong 17,7mA$$

Valor máximo da corrente máxima nos opto-emissores em 1.2):

$$I_{Fm_1.2} = \frac{2306}{78000} \cong 29,6mA$$

3.3.3.4 Detecção de circuito aberto de díodos

Durante a simulação notou-se que era possível usar a tensão que se estabelece quando há um díodo de um braço que entra em circuito aberto de maneira análoga á que se usou na detecção de díodos em curto-circuito.

Como se pode ver na figura 45 existe agora uma tensão positiva no espaço de tempo em que o díodo, e portanto o braço, devia estar em condução.

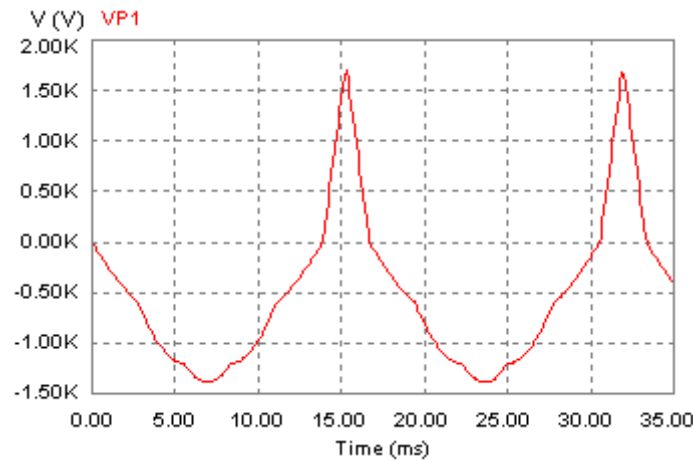


Figura 45: Forma de tensão sobre diodo em circuito aberto

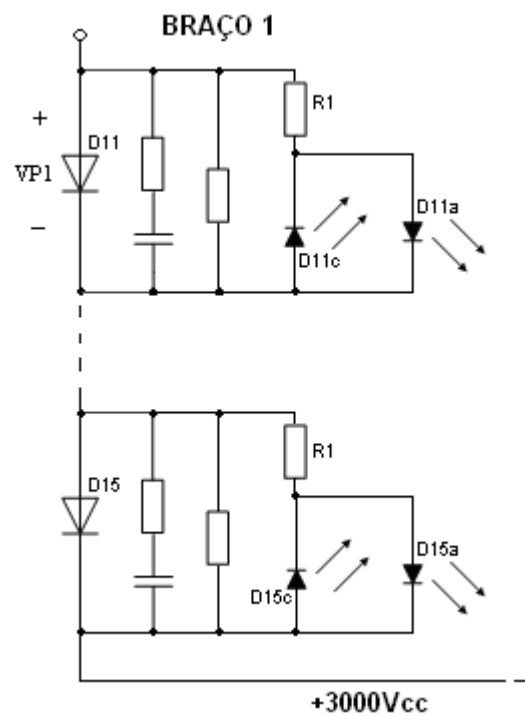


Figura 46: Montagem dos opto-emissores

Como se pode verificar por cálculo e simulação a tensão que se estabelece sobre um diodo em circuito aberto é idêntica em termos de valor máximo á tensão inversa do caso de curto-circuito. Assim usa-se a mesma resistência de limitação de corrente para os dois opto-emissores.

Para além de servir para detectar a presença da tensão directa sobre um diodo em circuito aberto, este segundo opto-emissor serve de protecção ao opto-emissor de curto-circuito, já que no caso de haver um diodo que entre em circuito aberto, sem este segundo opto-emissor, a tensão inversa sobre o opto-emissor de curto-circuito iria destruí-lo.

2) Tensão para o opto-emissor em paralelo, sinalizador de circuito aberto:

2.1) Tensão directa sobre um díodo em circuito aberto

$$U_{dm_d_2.1} = \frac{U_{di0}}{2} = 1655V \quad (2.1)$$

Demonstração:

Pode-se ver na figura 47 que quando um díodo, e portanto um braço, fica em circuito aberto, a tensão do barramento d.c. segue o valor máximo entre a fase imediatamente antes e imediatamente depois (+60° e -60° desfasadas). Assim a tensão aos terminais deste circuito aberto é a diferença entre a tensão da fase ligada ao braço e a tensão do barramento d.c. cujo valor máximo é:

$$\begin{aligned} U_{dm_d_2.1} &= U_{di0} * \sin(\pi / 2) - U_{di0} * \sin(\pi / 2 + \pi / 3) = \\ &= U_{di0} * \sin(\pi / 2) - U_{di0} * \sin(\pi / 2 - \pi / 3) = \frac{U_{di0}}{2} \end{aligned}$$

2.2) Tensão directa sobre um díodo em circuito aberto com outro do mesmo braço em circuito aberto.

$$U_{dm_d_2.2} \cong \frac{1655}{2} = 828V \quad (2.2)$$

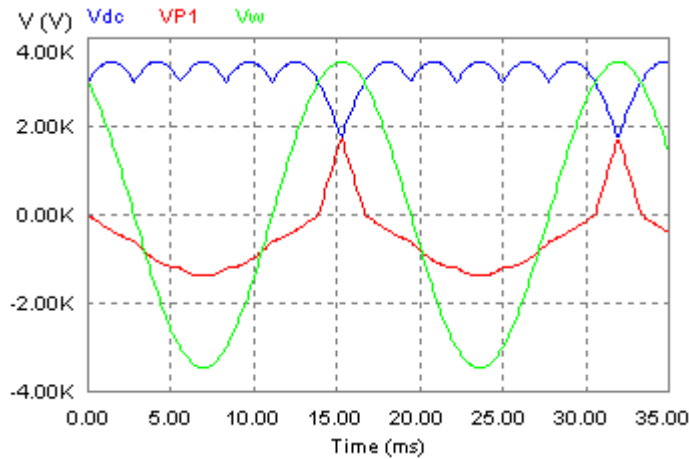


Figura 47: Formas de tensão com um díodo em circuito aberto

Análise da corrente nos opto-emissores:

Valor mínimo da corrente máxima nos opto-emissores em 2.2):

$$I_{Fm_2.2} = \frac{828}{78000} \cong 10,6mA$$

Contudo o pior caso, em termos de valor mínimo da corrente nos emissores, acontece quando os cinco díodos do mesmo braço ficam em circuito aberto. Aí a tensão directa do circuito aberto do braço divide-se pelas cinco resistências de equilíbrio de tensão ficando:

$$I_{Fm_min} = \frac{1655/5}{78000} \cong 4,3mA$$

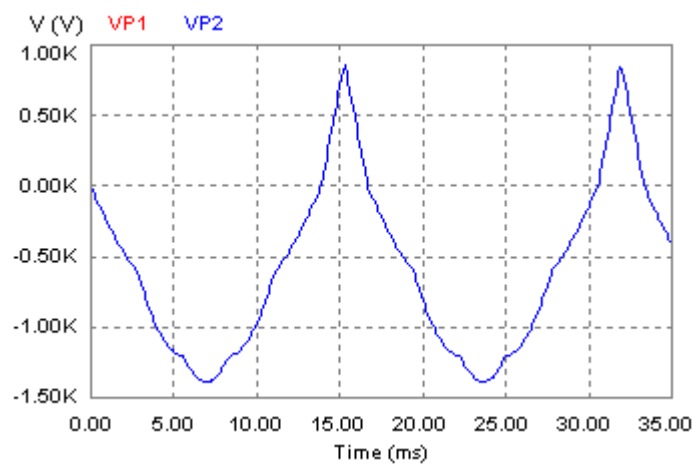


Figura 48: Formas de tensão com dois díodos em circuito aberto

3.3.3.5 Esquema geral da solução

Depois de encontrada a solução para a detecção individual de falhas nos díodos chegou-se ao seguinte desenho preliminar do sistema de detecção.

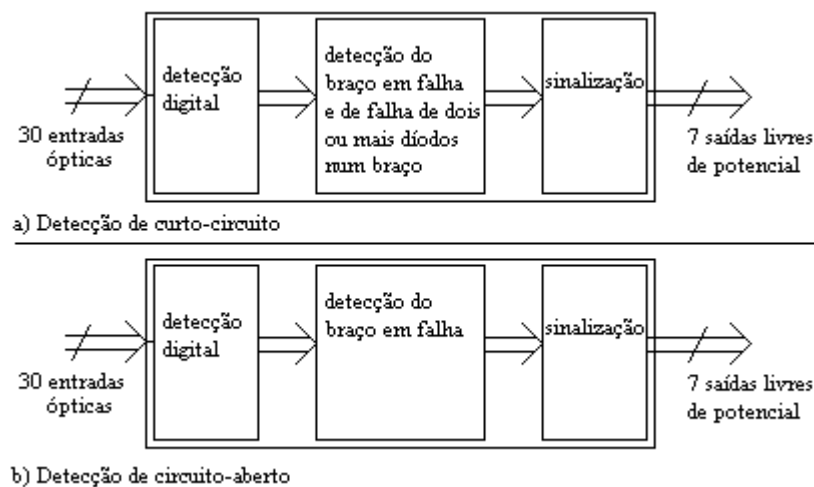


Figura 49: Desenho preliminar do sistema

Quer para o caso da detecção de curto-circuitos quer para o caso da detecção de circuitos abertos, foi decidido separar o sistema de detecção em duas cartas electrónicas, cada uma para um rectificador de seis braços com 30 entradas em fibra óptica correspondentes aos sinais de falha dos díodos. As 30 entradas ópticas são convertidas em sinais digitais sendo estes depois tratados num circuito lógico que tem seis saídas para sinalizar o braço em que ocorreu a falha de um díodo e mais uma saída para sinal de disparo no caso de falha de dois ou mais díodos em qualquer um dos braços.

3.3.3.6 Circuito de detecção de curto-circuito

O circuito de detecção de falhas nos díodos por curto-circuito é baseado num detector de falha de impulsos que é implementado com um foto-transistor e um circuito RC. Este circuito vai estar ligado por fibra óptica aos opto-emissores.

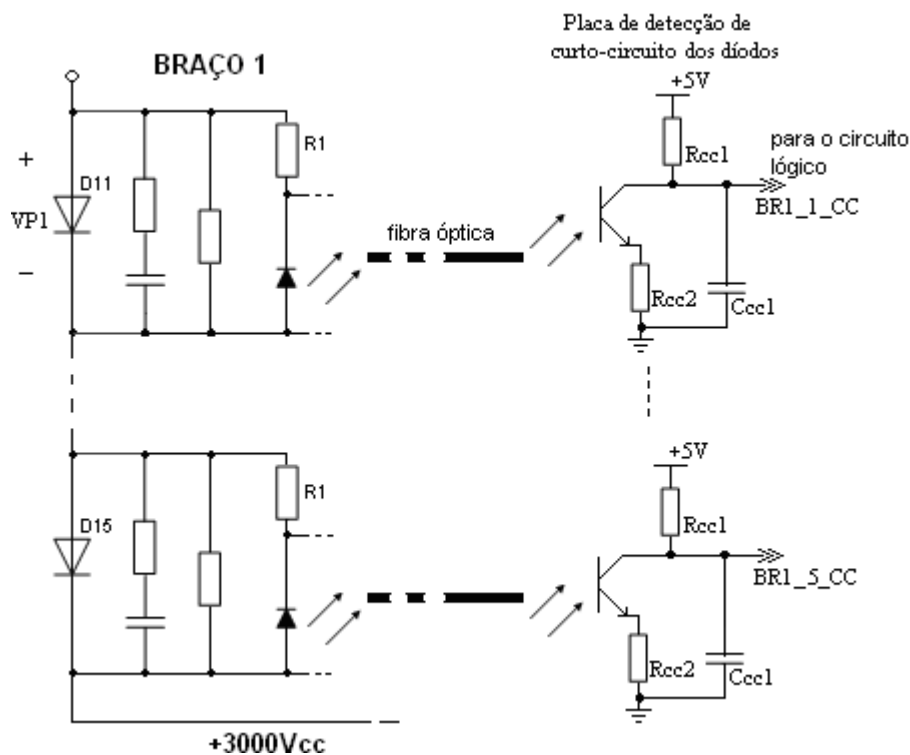


Figura 50: Circuitos de detecção de curto-circuito

Funcionamento:

Os impulsos de luz são produzidos pelo opto-emissor ligado em anti-paralelo com o díodo. Enquanto o díodo estiver em funcionamento normal haverá aos seus terminais uma tensão inversa durante o período de não condução. Esta tensão inversa produz uma

corrente suficiente para activar o opto-emissor e para a luz emitida ser detectada pelo opto-detector (foto-transistor).

Na placa de detecção, o condensador é carregado através da resistência R_{cc1} de valor elevado mas os impulsos de luz vão por o foto-transistor em condução descarregando o condensador na resistência R_{cc2} . Quando os impulsos falharem, a tensão no condensador C_{cc1} sobe até passar o valor limiar do nível lógico “1” do circuito lógico, denominado por V_{IH} , altura em que é detectado o curto-circuito do díodo.

A constante de tempo de $R_{cc1}.C_{cc1}$ é calculada de modo a que a tensão no condensador não passe a tensão máxima do nível lógico “0”, V_{IL} do circuito lógico a jusante, durante a falha de três impulsos (correspondente a três ciclos da tensão de uma fase e cerca de 50 ms a 60Hz).

O sinal BRI_I_CC e os restantes são depois juntos num circuito lógico composto por três dispositivos programáveis do tipo GAL (*General Array Logic*) de referência GAL22V10.

Dimensionamento do circuito RC:

GAL 22V10 :

$V_{IL} = 0,8V \rightarrow$ Tensão máxima do nível lógico "0"

$V_{IH} = 2,0V \rightarrow$ Tensão mínima do nível lógico "1"

Cálculo de RC de modo a não detectar falhas de duração inferior a 50 ms:

$$\frac{0,8}{5} * 100\% = 16\% \Rightarrow 16 = 100 \left(e^{\frac{-0,050}{RC}} \right) \Leftrightarrow \tau_1 = RC \cong 280ms$$

$$R_{cc1} = 33K\Omega \quad , \quad C_{cc1} = 10\mu F \Rightarrow \tau_{cc1} = R_{cc1}C_{cc1} \cong 330ms$$

Determinação do tempo máximo para detecção de falha:

$$\frac{2}{5} * 100\% = 40\% \Rightarrow 40 = 100 \left(e^{\frac{-t}{0,330}} \right) \Leftrightarrow t \cong 168ms$$

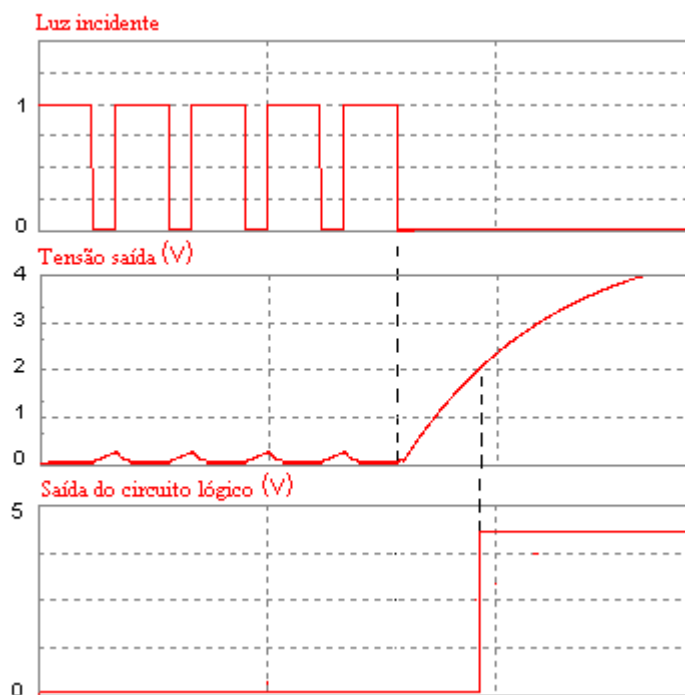


Figura 51: Previsão de ondas do circuito de detecção de curto-circuito

3.3.3.7 Circuito de detecção de circuito aberto

O circuito de detecção de falhas nos díodos por circuito aberto é baseado num detector de presença de impulsos ao contrário do circuito de detecção de curto-circuito. Este circuito é também implementado com um foto-transistor e um circuito RC e vai estar ligado por fibra óptica aos opto-emissores.

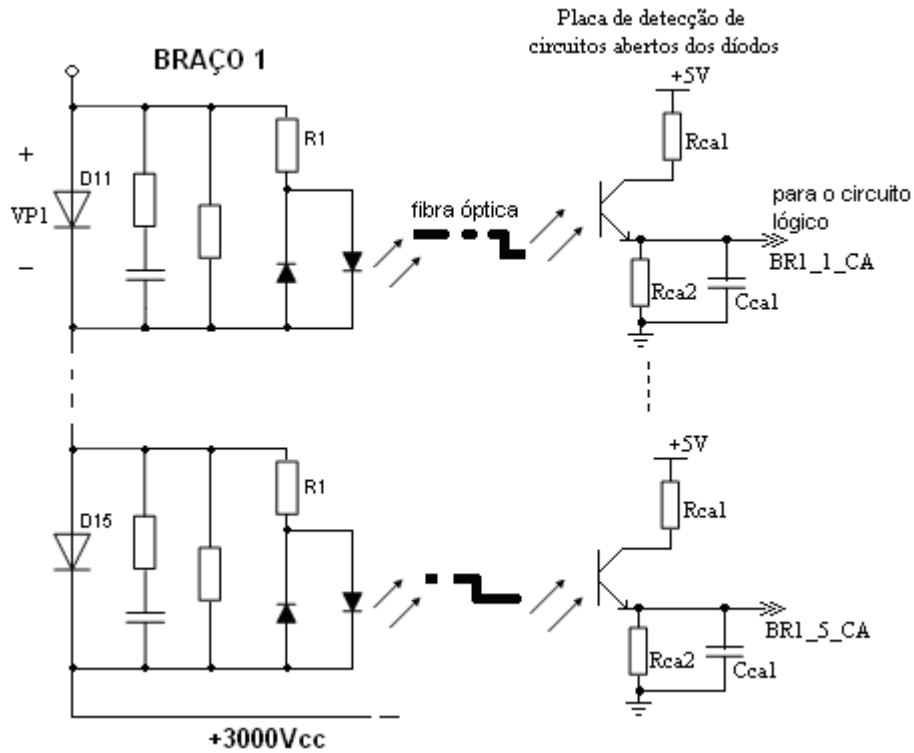


Figura 52: Circuitos de detecção de circuito aberto

Funcionamento:

Os impulsos de luz só são produzidos pelo opto-emissor ligado em paralelo com o diodo quando este entra em circuito aberto. Quando isso acontece vai haver uma tensão directa que produz uma corrente suficiente para activar o opto-emissor e para a luz emitida ser detectada pelo opto-detector (foto-transistor).

Na placa de detecção, enquanto não houver falha os sinais têm o nível lógico “0” mas quando a luz for transmitida, o foto-transistor entra em condução carregando o condensador. O condensador é depois lentamente descarregado na resistência R_{ca2} quando deixar de haver luz e portanto deixar de haver falha no diodo. Usa-se a mesma constante de tempo usada no circuito de detecção de curto-circuito para, no caso de falha de três impulsos e com o diodo em circuito aberto, o nível de tensão continuar alto.

O sinal $BR1_I_CA$ e os restantes são depois juntos num circuito lógico.

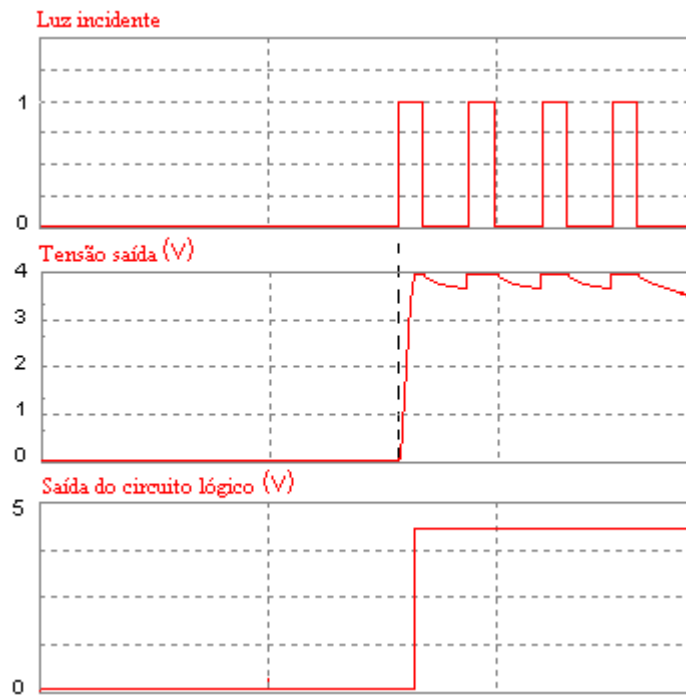


Figura 53: Previsão de ondas do circuito de detecção de circuito aberto

3.3.3.8 Ligação por fibra óptica

Para a ligação óptica entre os opto-emissores e opto-detectors foi usado um cabo de fibra óptica de diâmetro 1000 μ m e 500 μ m de diâmetro da fibra.

Os opto-emissores utilizados foram os SFH756V e os opto-detectors foram os SFH350V.

Estes dispositivos ópticos são ideais pois vêm encapsulados numa base de plástico que permite uma ligação fácil do cabo de fibra óptica. Para além disso o opto-detector é composto por um foto-transistor que para esta aplicação é mais adequado por não precisar de amplificação adicional como seria o caso do foto-díodo. A principal desvantagem do foto-transistor face ao foto-díodo é na rapidez de resposta, que para a aplicação não necessita de ser alta por não se tratar de uma transferência de grandes quantidades de dados a altas taxas de transmissão.



Figura 54: Aspecto dos opto-emissores e opto-detectors

Planeamento da linha de transmissão

Emissor SFH756V:

Potência de saída = $200\mu W$ ($I_f=10mA$, $\lambda=660nm$).

$$P_e = 0,2mW$$

$$x_e = 10 \log_{10} 0,2 \cong -7dBm$$

Detector SFH350V:

Potência de entrada = $10\mu W$ ($I_{CE}=0,8mA$, $\lambda=660nm$).

$$P_d = 0,01mW$$

$$x_d = 10 \log_{10} 0,01 \cong -20dBm$$

Tabela 4: Planeamento da linha de transmissão por fibra óptica

Potência extra	$x = -7 - (-20) = 13dBm$
Atenuação dos primeiros metros	$2dB$
Efeitos de temperatura (-20 a 45°C)	$1dB$
Envelhecimento	$2dB$
Gama de distribuição de potência do emissor	$1,5dB$
Potência disponível para a transmissão	$x_1 = 13 - 2 - 1 - 2 - 1,5 = 6,5dBm$
Atenuação da fibra óptica (<i>datasheet</i>)	$0,18dB / m$
Comprimento máximo do cabo	$L = \frac{6,5}{0,18} \cong 36m$

Alguma da informação presente na tabela foi retirada de uma nota de aplicação da AVAGO Technologies [17].

3.3.3.9 Circuito lógico para sinalização

De cada díodo é proveniente um sinal de falha. Estes sinais têm o nível lógico “1” enquanto há falhas dos respectivos díodos. É necessário tratar esses sinais de modo a identificar o braço em falha e obter o sinal de disparo.

Para isso usa-se um circuito lógico composto por dispositivos lógicos programáveis do tipo GAL (“*Generic Array Logic*”) que são matrizes de portas lógicas programáveis.

Este dispositivo é usado por permitir, apenas num circuito integrado, operações lógicas que levariam ao uso de muitos circuitos integrados de lógica discreta se fossem usados.

Funcionamento para o sinalizador de curto-circuito:

Por cada braço é preciso fazer o “OU” lógico dos cinco sinais para sinalizar a falha de um díodo no braço como se vê na parte esquerda da figura 55. Os seis sinais resultantes correspondem às saídas de alarmes. Para detectar dois ou mais díodos em falha no mesmo braço é necessário fazer o “E” lógico dos sinais de falha dois a dois resultando em dez produtos e depois fazer um “OU” com as dez saídas para se obter o sinal de falha de dois ou mais díodos no braço correspondente. Com este sinal de falha e os outros dos restantes braços faz-se o “OU” para se obter o sinal de disparo (*TRIP*).

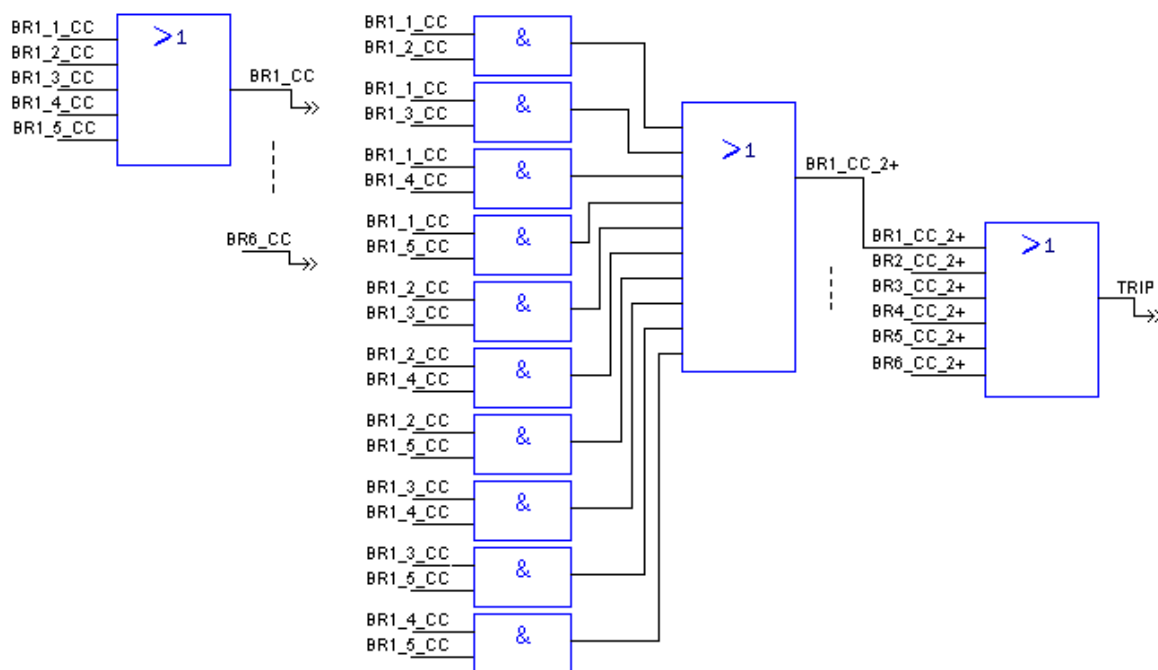


Figura 55: Circuito com portas lógicas para sinalizar curto-circuitos

Funcionamento para o sinalizador de circuito aberto:

Por cada braço é feito o “OU” dos sinais dos cinco díodos para se obterem seis sinais de alarme indicativos da falha de pelo menos um díodo em cada braço, e depois é feito o “OU” dos sinais de falha dos seis braços, de modo a obter-se apenas um sinal de disparo. Neste caso quer-se o sinal de disparo á primeira falha de um dos díodos pois isso implica a

entrada em circuito aberto de todo o braço no caso deste tipo de rectificador com vários díodos em série.

A entrada em circuito aberto de um dos braços iria dar origem a um maior ripple da tensão d.c. e provocar harmónicos de maior amplitude comprometendo gravemente o funcionamento do rectificador como já foi aqui apresentado.

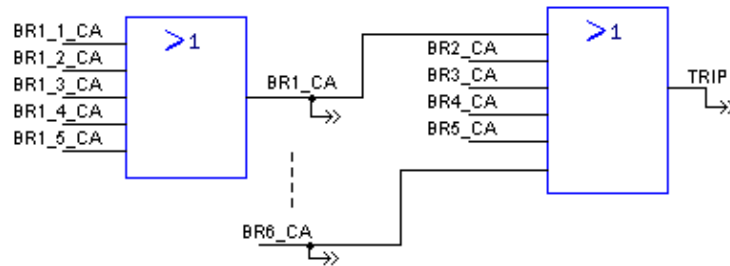


Figura 56: Circuito com portas lógicas para sinalizar circuitos abertos

3.3.4 Implementação

3.3.4.1 Carta electrónica única

Devido às semelhanças entre os dois circuitos de detecção decidiu-se usar apenas uma placa de circuito impresso para o circuito de detecção que fosse configurável para os dois casos. Para isso usou-se a montagem da figura seguinte com três pinos de teste juntos de modo a possibilitar a escolha da configuração com um *jumper*. Adicionalmente as resistências R1 e R2 têm de ser trocadas para o modo de detecção de curto-circuito e para o modo de detecção de circuito aberto.

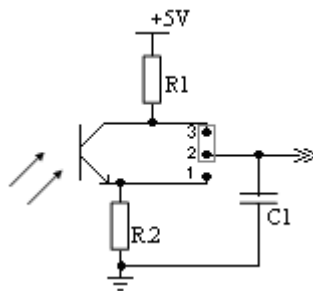


Figura 57: Circuito configurável do opto-detector

3.3.4.2 Placa de opto-emissor

Para a montagem dos opto-emissores fez-se uma placa para cada um que será montada em paralelo com cada diodo de potência.

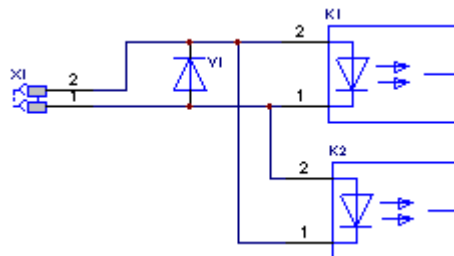


Figura 58: Esquema da placa de opto-emissor

Esta placa também foi preparada para os dois modos de funcionamento tendo dois locais para soldagem de opto-emissores embora seja soldado apenas um. Para detecção de curto-circuito usa-se o emissor K1 e o diodo de protecção V1 que serve para protecção do opto-emissor caso o diodo entre em circuito aberto. Para detecção de circuito aberto usa-se o opto-emissor K2 e o diodo soldado na posição inversa de modo a ficar em anti-paralelo com o emissor.

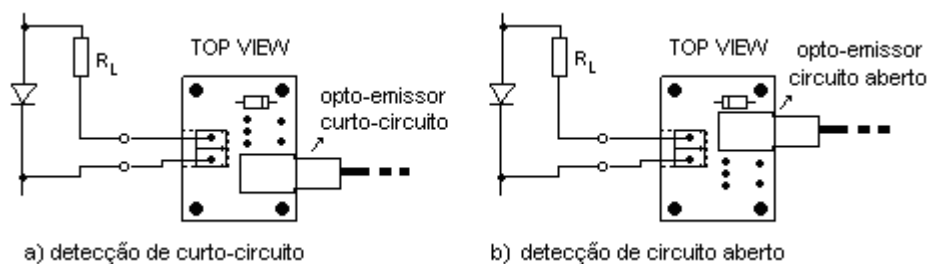


Figura 59: Montagem das placas de opto-emissores

Optou-se pela montagem da resistência de limitação de corrente R_L fora da placa de circuito impresso por ser uma resistência de potência superior a $50W$. A montagem de R_L ficou a cargo do instalador devendo ter um valor entre $75K\Omega$ e $82K\Omega$.

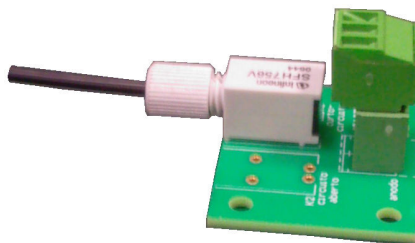


Figura 60: Fotografia da placa protótipo de opto-emissores

3.3.4.3 Placa de detecção

Durante a execução da placa foi pedido pelo cliente a expansão da placa para o funcionamento com rectificadores com seis díodos em série pelo que tiveram que ser adicionados mais seis opto-detectores.

A placa de circuito impresso de detecção é então composta por uma fonte de alimentação, 36 circuitos de detecção iguais ao da figura 57, três GAL que constituem o circuito lógico e relés para sinais de alarme e disparo juntamente com o seu *driver*.

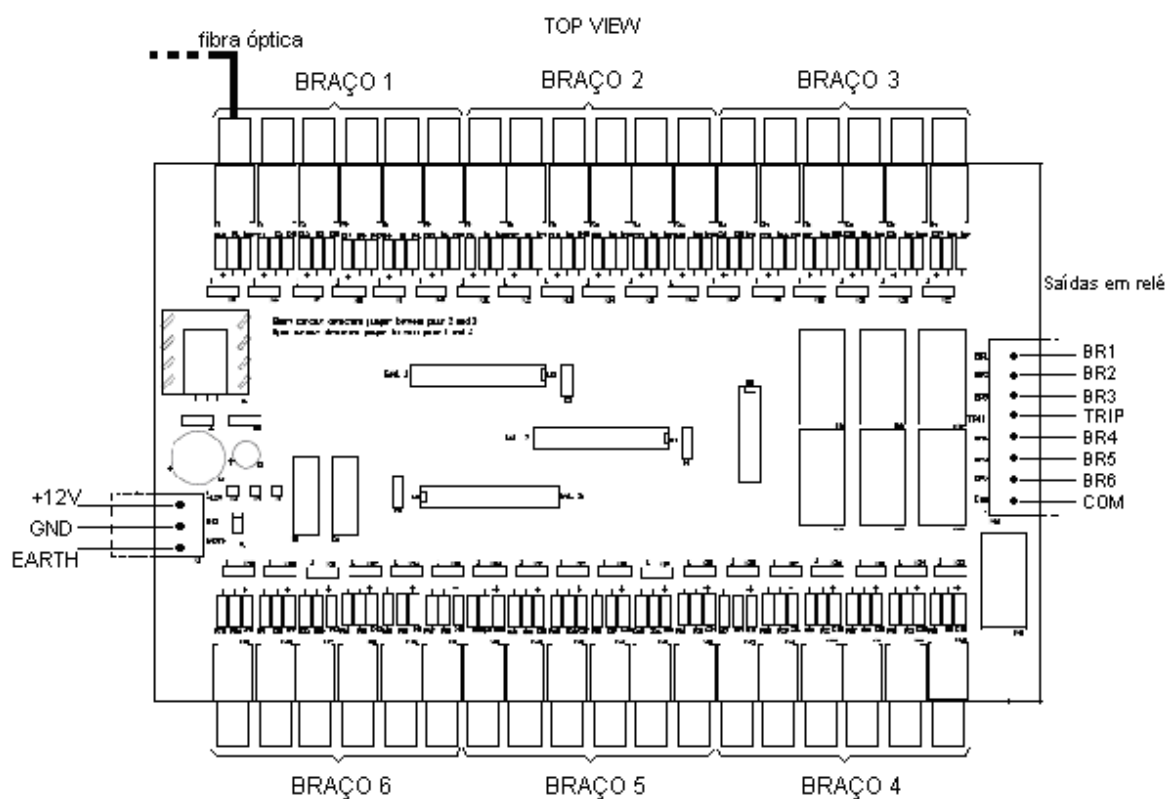


Figura 61: Placa de detecção

Fonte de alimentação:

A alimentação da placa é de 12Vd.c. sendo esta tensão usada para os relés e regulada para 5V para alimentar o circuito lógico.

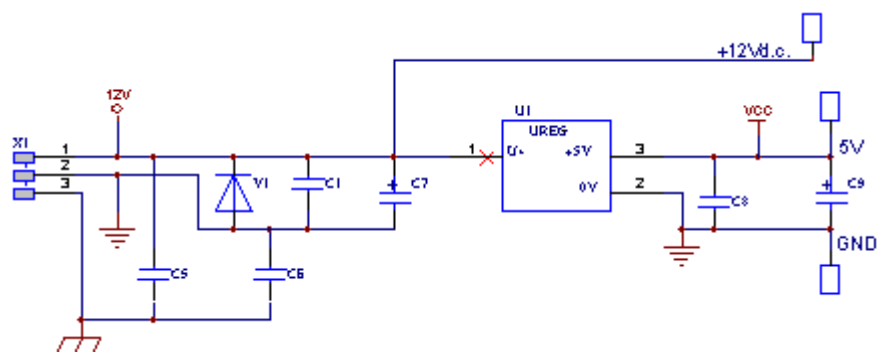


Figura 62: Esquema da alimentação da placa

Circuito de detecção:

O circuito de detecção transforma os sinais de luz em sinais digitais através do foto-transistor e circuito RC. Existem 36 circuitos.

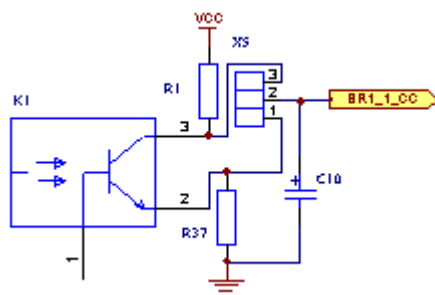


Figura 63: Esquema da detecção

Circuito lógico:

O circuito lógico é composto por três GAL22V10, cada uma responsável pela sinalização de falhas de dois dos braços. Uma das GAL é também responsável pela obtenção do sinal de TRIP fazendo o “OU” lógico entre os seis sinais de falhas de dois ou mais díodos em cada braço.

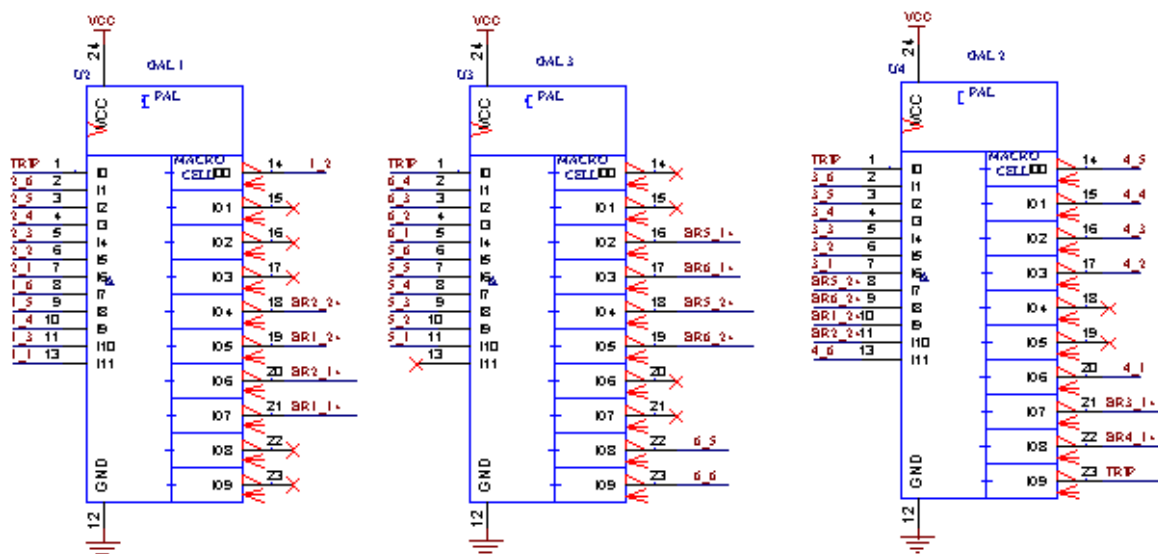


Figura 64: Esquema do circuito lógico

A programação das GAL foi feita na linguagem de programação CUPL, recorrendo a um software gratuito da *ATMEL*, o *WinCUPL*. Este software permite compilar os programas em *CUPL* para ficheiros no formato *JEDEC* (*.jed), que são um formato normalizado aceite pelos programadores deste tipo de dispositivos lógicos. Para além disso, o software permite também simular o funcionamento de vários dispositivos lógicos, incluindo a *GAL22V10*, através de diagramas temporais.

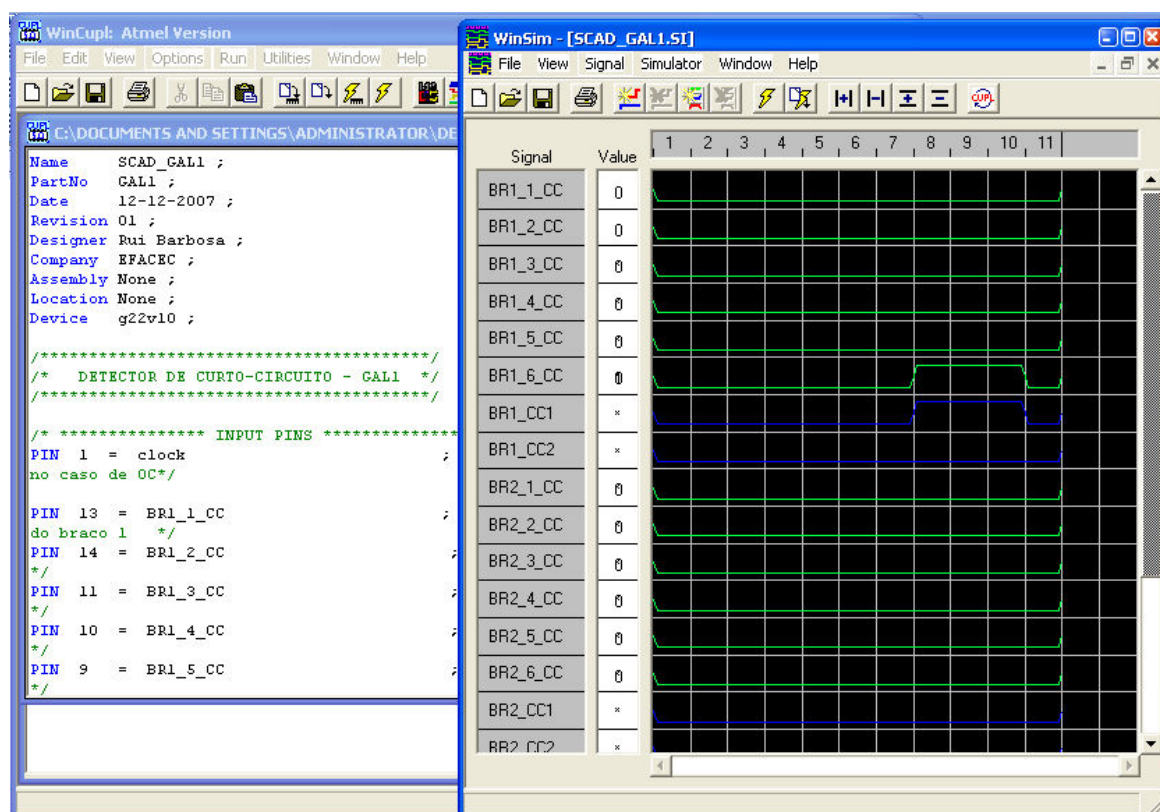
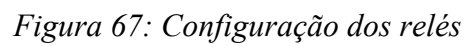
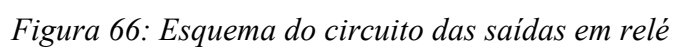


Figura 65: Aspecto do software de programação das GAL

Circuito de saída:

O circuito de saída é composto por sete relés de contacto normalmente aberto activados por um driver ligado às saídas das GAL. O driver ULN2003 não é mais do que um array de sete pares de darlington para amplificação de corrente e com díodos de *free-wheeling* para protecção contra sobretensões das bobinas dos relés.



3.3.4.4 Ligação do sistema completo

O sistema vai ser ligado conforme a figura seguinte. As placas de opto-emissores são ligadas em paralelo com os díodos de potência e ligadas á placa de detecção por cabos de fibra óptica.

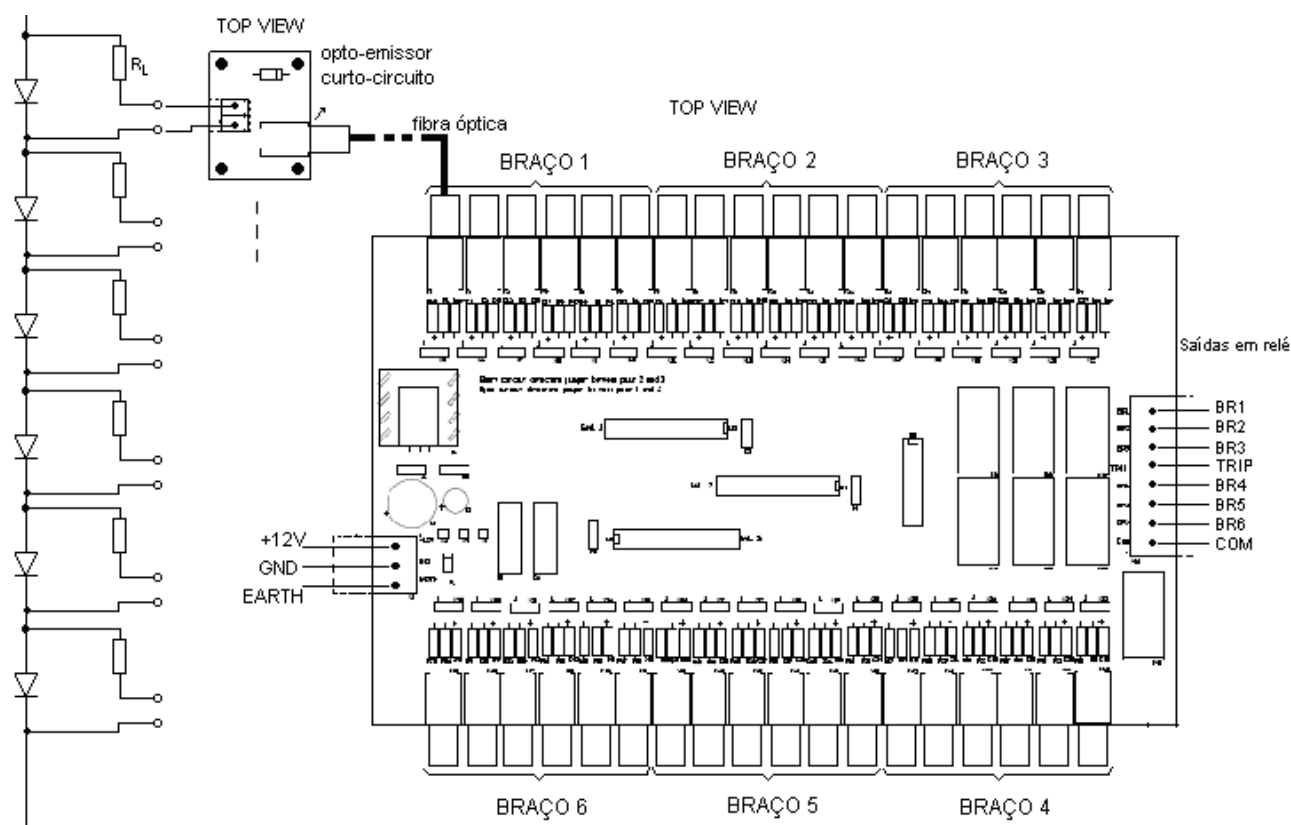


Figura 68: Ligações do sistema completo

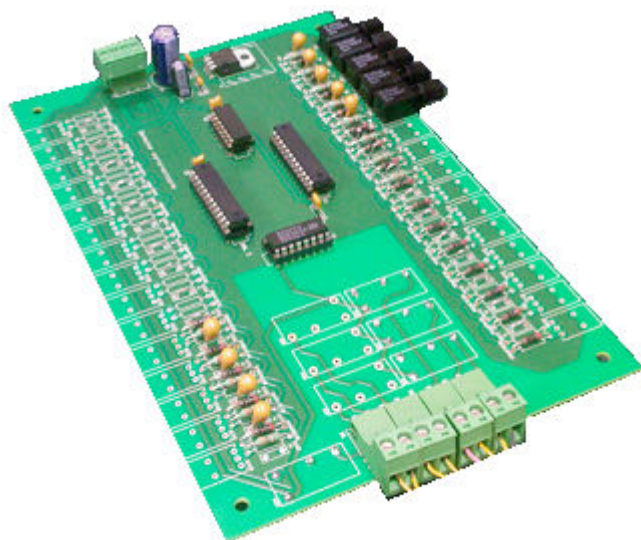


Figura 69: Foto da placa de protótipo

3.4 Estudo de um Sistema para Díodos em Paralelo

3.4.1 Introdução

O sistema desenvolvido e chamado de SOCAD “*Short and Open Circuit Arm Detector*” funciona bem para rectificadores com vários díodos em série por braço, especialmente no modo de detecção de díodos em curto-circuito. Isto deve-se ao facto de um díodo em curto-circuito não impedir o funcionamento do rectificador nem causar um curto-circuito interno o que torna possível que o sistema sinalize a falha antes de se dar a fusão dos fusíveis de protecção de cada braço do rectificador.

No entanto para configurações de rectificadores com apenas um díodo em série mas vários em paralelo por braço, como o caso do rectificador da figura seguinte, o sistema torna-se ineficaz pois quando um dos díodos entrar em curto-circuito dar-se-á um curto-circuito interno e o fusível de protecção desse díodo fundir-se-á antes de ser detectada a falha através do método de opto-emissor e detector desenvolvido.

Também no caso de detecção de circuitos abertos utilizar um opto-emissor em paralelo com os díodos não permite detectar díodos individuais em falha pois a tensão aos seus terminais não se vai alterar sendo os outros díodos a conduzir a corrente. Neste caso só era possível detectar quando todos os díodos do braço entrassem em circuito aberto, o que não é provável. No entanto o circuito aberto de um dos díodos de um braço vai provocar correntes maiores nos restantes o que, por sua vez, pode dar origem a falhas nesses díodos.

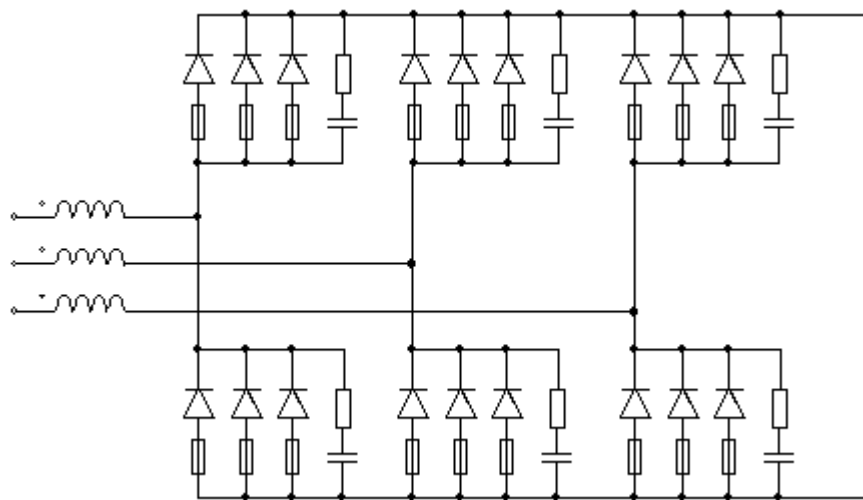


Figura 70: Rectificador em ponte com três díodos em paralelo por braço

Sendo assim é proposto um sistema de detecção baseado em sensores indutivos de corrente, preferencialmente do tipo de sensores de Hall.

Estes sensores seriam colocados em série com apenas um dos díodos de cada braço, independentemente do número de díodos colocados em paralelo no braço, sendo um total de seis sensores. Isto permite a detecção de díodos em circuito aberto por análise de correntes. Adicionalmente utilizam-se fusíveis com microcontacto para sinalização de dispositivos fundidos tendo como causa provável a entrada em curto-circuito do díodo correspondente. Note-se que no caso de um curto-circuito externo as protecções do rectificador devem estar dimensionadas de modo a ser accionado o disjuntor do lado AC antes da fusão dos fusíveis.

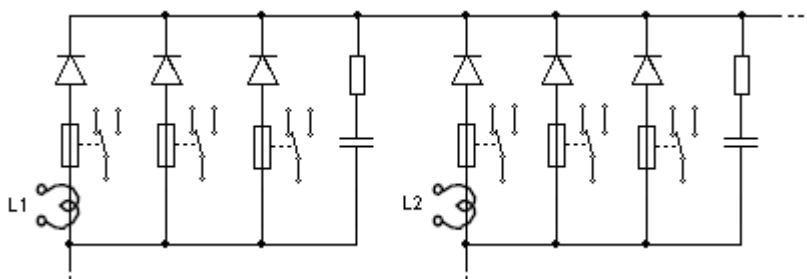


Figura 71: Configuração dos sensores de corrente e microcontactos

3.4.2 Princípio de Funcionamento

A detecção de curto-circuitos neste sistema é feita pela posição dos microcontactos que são accionados quando o fusível correspondente se funde.

A detecção de circuitos abertos nos díodos é feita por análise do valor médio da corrente em cada sensor. Quando o valor médio dado por um dos sensores é inferior aos valores médios dos restantes e não existem fusíveis fundidos, significa que um dos díodos em paralelo com o díodo que tem o sensor entrou em circuito aberto. Neste caso o valor médio seria cerca de $2/3$ dos valores dos braços sem díodos em falha. Também se pode dar o caso em que o valor de corrente no sensor é nulo. Aí sabe-se que foi o díodo em série com o sensor que entrou em circuito aberto.

Com este método pode-se detectar o braço com o díodo em circuito aberto e detectar todos os fusíveis fundidos.

Sendo necessárias entradas analógicas, pode-se aproveitar o sistema para fazer monitorização de correntes, tensões e temperaturas do rectificador.

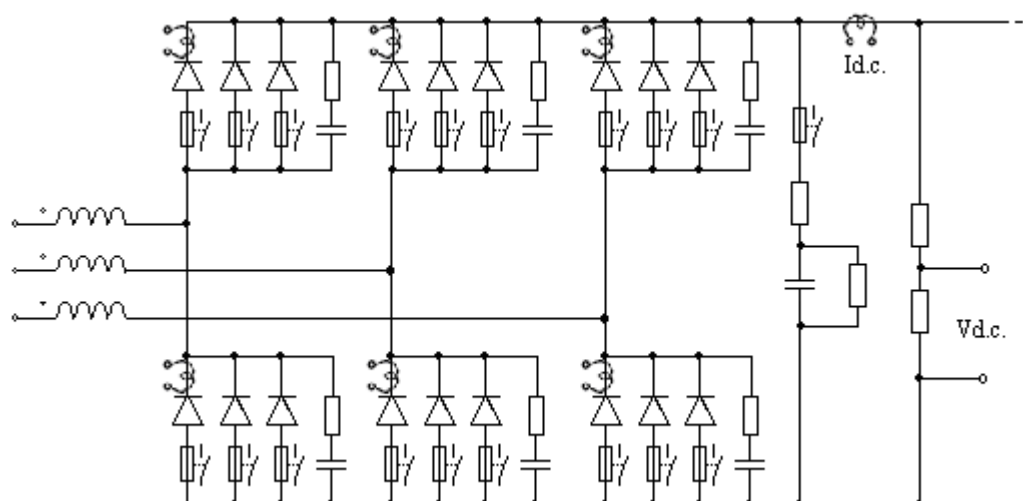


Figura 72: Configuração dos sensores e microcontactos

Com a necessidade de entradas analógicas pode-se criar um sistema de protecção completa, com monitorização da corrente e tensão d.c., bem como dos estado de todos os fusíveis do sistema. Seria também possível a ligação de sensores de temperatura localizados junto aos díodos para sua protecção.

Capítulo 4

4. Testes da Carta

O sistema chamado de SOCAD foi implementado com sucesso. Para garantir o funcionamento das cartas electrónicas configuradas para detecção de curto-circuitos foi desenvolvido um procedimento de testes.

O procedimento de testes desenvolvido permite testar o funcionamento dos opto-detectors e lógica associada á detecção em cada braço individualmente, já que o teste completo do sistema iria ser muito moroso devido ao número elevado de opto-emissores e detectores a ligar (36 placas de opto-emissores).

Para testar cada braço individualmente, ligam-se cinco ou seis placas de opto-emissores a um gerador de sinais que gere uma onda quadrada com frequência de cerca de $60Hz$ (0 a $5V$, por exemplo) limitando a corrente a passar no opto-emissor, composto por um led, a cerca de $10mA$. Para além disso têm de se ligar todas as entradas do circuito lógico correspondentes aos detectores não utilizados no teste á massa. Para isso utilizam-se jumpers ligados entre os pinos 1 e 2 para os detectores não utilizados e entre os pinos 2 e 3 para os detectores do braço testado.

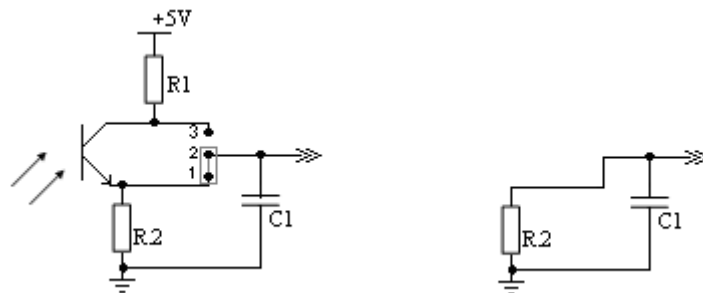


Figura 73: Detectores não usados

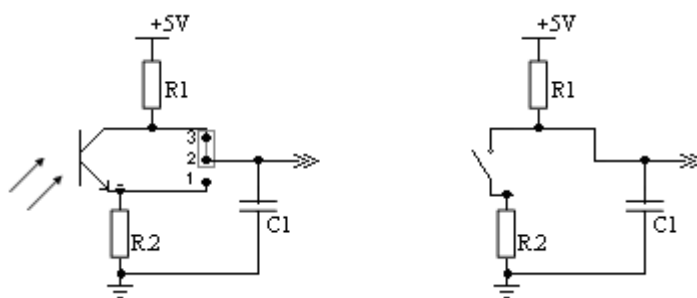


Figura 74: Detectores em teste

Dos opto-emissores ligam-se os cabos de fibra óptica até aos detectores do braço que se pretende testar (conforme figura 75).

Ao desligar um dos cabos de fibra óptica (FO), o relé correspondente deverá atracar e ao desligar uma segunda, deverá atracar também o relé de disparo (*TRIP*). Se isso não acontecer podem haver vários motivos que são resumidos na tabela seguinte.

Tabela 5: Possíveis falhas e seus motivos

Componente em falha	Modo de detecção	Razões prováveis
Opto-emissor	Não emitem luz vermelha	Placa do emissor mal ligada. Falha nos opto-emissores.
Opto-receptor	Tensão baixa (nível lógico “0”) no terminal positivo do condensador com a fibra óptica desligada.	Falha nos opto-receptores Má ligação ou troca do valor das resistências ou condensador.
GAL	Saída da GAL correspondente á falha com nível baixo com a fibra óptica desligada.	Má programação. Falha.
Relés / driver	Saída da GAL com o nível alto mas sem fecho do contacto do relé.	Má ligação do driver. Falha no driver ou relé.

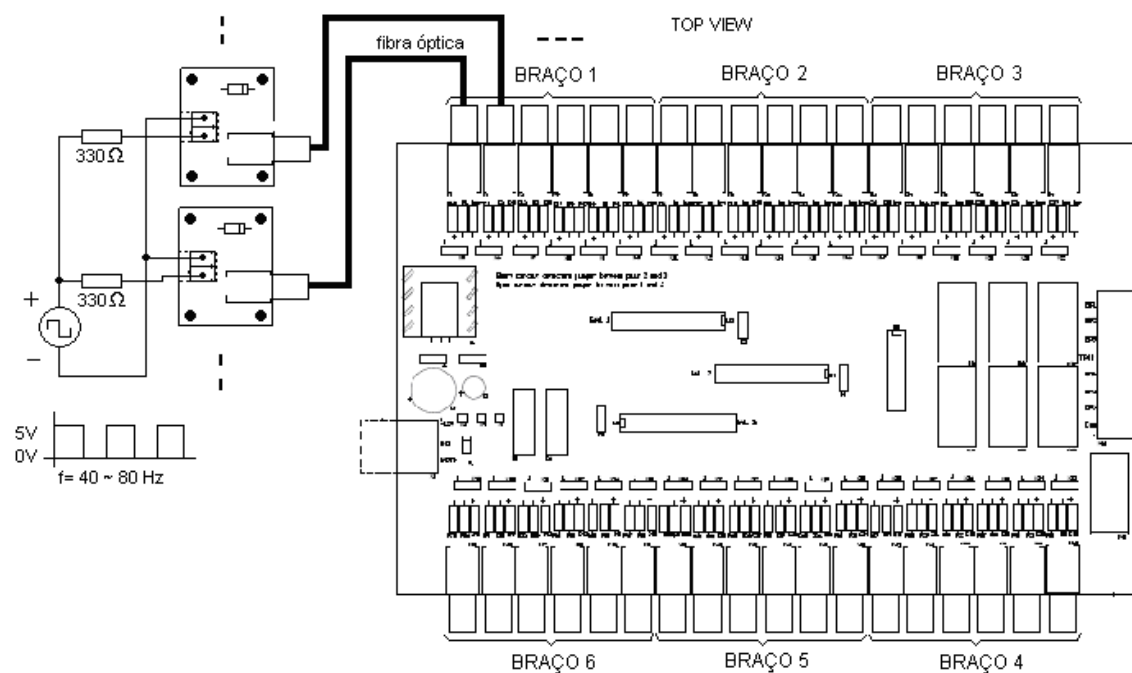


Figura 75: Ligação do esquema de testes

Durante a fase de testes às placas apenas foi detectado um opto-detector avariado numa das quatro placas de detecção pedidas pelo cliente.

Capítulo 5

5. Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento

Neste trabalho foram estudados métodos de protecção e detecção de falhas em rectificadores de tracção.

Como introdução, foram estudados os sistemas de tracção e principais topologias de rectificadores de tracção. Aqui e como justificação do uso de topologias, em geral, de duas ou mais pontes de Graëtz em série e/ou em paralelo, foram estudados os harmónicos e suas consequências com base essencialmente na norma IEEE 519.

Procuraram-se métodos existentes de detecção de falhas com recurso principalmente a motores de busca de patentes, dos quais se destaca o google patents, e após esta busca fez-se uma análise comparativa das soluções encontradas. Desta análise concluiu-se que se necessitava de uma solução mais simples para a configuração dos rectificadores de tracção existentes e para os quais se iria desenvolver o sistema de protecção.

Para além dos métodos de detecção e protecção contra falhas estudados, que se basearam na detecção de falhas individuais de díodos, foram estudadas também outras protecções usuais nos rectificadores de potência. Estudaram-se protecções contra sobretensões, incluindo *snubbers* e o uso de condensadores no barramento d.c. e também fusíveis para protecção contra correntes de curto-circuito. Deste estudo concluiu-se que, para o dimensionamento correcto dos díodos e fusíveis é necessário conhecer em pormenor as tensões e possíveis sobretensões, bem como as correntes de curto-circuito. Estas correntes têm uma grande dependência dos parâmetros do transformador que alimenta o rectificador sendo o projecto do rectificador e suas protecções sempre dependente e ligado ao projecto do transformador.

Para melhor perceber a necessidade de protecções e de um sistema que detecte falhas de componentes antes de existir uma falha grave no funcionamento do rectificador, foi feito o

cálculo e simulação de correntes de curto-circuito para uma ponte de Graëtz que é o componente mais usual dos rectificadores de tracção modernos. Com esta análise concluiu-se que as correntes de curto-circuito são, geralmente, um múltiplo entre 5 e 10 da intensidade de corrente em funcionamento normal, dependendo sobretudo da impedância do transformador. Nota-se também que a corrente de curto-circuito atinge o pico máximo no caso de um curto-circuito interno, no braço em falha, sendo cerca de 20% superior aos picos de correntes no caso de um curto-circuito externo.

O sistema de detecção de falhas, que permitiu desenvolver o presente trabalho, foi desenvolvido para rectificadores de tracção existentes no Brasil e que necessitavam de ser actualizados.

Quanto ao seu projecto, partiu-se de vários esquemáticos da instalação actual dos rectificadores e da ideia de usar leds em paralelo com os díodos de potência. De seguida fez-se um estudo das tensões de funcionamento normal do rectificador hexafásico simples, com foco na tensão inversa sobre cada díodo durante o período de não condução. Este estudo permitiu dimensionar a resistência de limitação de corrente para os leds em paralelo com os díodos e permitiu também verificar que se podiam usar dois leds em paralelo com cada díodo de modo a detectar falhas quer por curto-circuito, quer por circuito aberto dos díodos de potência.

Devido ao elevado número de díodos no grupo rectificador composto por dois rectificadores hexafásicos simples em paralelo, e com seis díodos em série por braço (72 díodos no total), teve de ser pensada a melhor forma da disposição espacial das cartas electrónicas tanto dos leds (ou opto-emissores) como do circuito de detecção. No final foi decidido separar o circuito de detecção por duas cartas electrónicas (uma por rectificador) e construir as cartas de tal forma que permitissem a configuração como detector de curto-circuitos ou como detector de circuitos abertos. Assim pode-se, no futuro, fornecer ao cliente um sistema detector de circuitos abertos sem alterar em nada o projecto, apenas mudando o programa dos dispositivos lógicos programáveis e trocando alguns componentes nas placas de circuito electrónico.

A solução encontrada tem, no entanto, a limitação de não guardar em memória os dispositivos em falha no caso de falha de alimentação do rectificador, sendo esta uma possibilidade de futuro desenvolvimento. Isto envolveria o uso de um microcontrolador em vez dos dispositivos lógicos usados. Outra limitação da solução é o facto de permitir detectar falhas individuais em díodos mas apenas quando se usam vários díodos em série por braço, sendo ineficaz em configurações com vários díodos em paralelo que são normalmente protegidos individualmente com fusíveis. Para este último caso foi estudada uma solução com o uso de sensores de corrente em série com os díodos em vez do uso de opto-emissores em paralelo.

Na última parte do presente relatório é descrito um procedimento de testes que tiveram de ser efectuados antes do envio das cartas electrónicas e forma incluídos no manual do sistema. Note-se que não foi possível testar o sistema nos rectificadores e teve de se testar com o uso de uma fonte geradora de sinais para simular a corrente prevista nos leds. Apesar disso os testes permitiram verificar o funcionamento correcto primeiro da carta de protótipo e depois do sistema final.

Conclui-se assim que o objectivo de criação da carta electrónica foi cumprido com sucesso e o sistema proposto para o caso de outra disposição dos díodos nos braços do rectificador deixa espaço para um trabalho futuro.

Referências Bibliográficas

- [1] US Patent #4186391 - Apparatus for detecting diode failures in multiple diode rectifier bridges, Shou-I Wang et al, 1978

- [2] US Patent #4713652 – “Electrical apparatus”, Steven J. French et al, 1987

- [3] World Intellectual Property Organization Patent WO/2002/001698 – “Alternator testing method and system using ripple detection”, Dennis G. Thibedeau et al, 2002

- [4] US Patent #5206801 – “AC/DC converter fault detector”, John R. Flick et al, 1993

- [5] US Patent #5225815 – “Monitor for a polyphase rectifier which detects open diodes by sensing a signal below a predetermined threshold”, Benot Bocquet et al, 1993

- [6] US Patent #3806906 – “IINVHN HUN”, John A. I. Young, 1974

- [7] Raoul Mascarin, “Redresseurs Industriels A Semiconducteurs”, 1973

- [8] Jürg Waldmeyer, Björn Backlund, “Design of RC Snubbers for Phase Control Applications” ABB Application Note, 2001

- [9] Po-Tai Cheng, “Snubber Circuits”

- [10] Sam Guccione, Mahesh M. Swamy, Ana Stankovic, “The Power Electronics Handbook - 4.1 Uncontrolled Single-Phase Rectifiers”

- [11] John Merrell, “The Importance of the X/R Ratio in Low-Voltage Short Circuit Studies”
- [12] Ferraz Shawmut, Catalog: “Protistor DC Fuses”
<http://www.ferraz-shawmut.com/advisor/pdf/PCOtherMC.pdf>, em 2008/01
- [13] Página Web: <http://www.efacec.pt>, em 2007/11
- [14] European Standard EN50163, “Railway applications – Supply voltages of traction systems”
- [15] Página Web: http://en.wikipedia.org/wiki/Rail_electrification, em 2008/01
- [16] Karl M. Hink: “18 Pulses Drives And Voltage Unbalance”
- [17] Application Note 5342, Avago Technologies, “Plastic Fiber Optic Components”
- [18] Página Web: “The CUPL environment tutorial”:
<http://www.rexfisher.com/Downloads/CUPL%20Tutorial.htm>, em 2008/01
- [19] Jerry C. Whitaker: “Microelectronics”
- [20] Ferraz, “Behaviour and Selection of Fuses for the Semi-conductors Protection”, 1993
- [21] Schneider Electric - Cahier Technique no. 183, E. Bettega, J-N. Fiorina “Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers”:
http://www.schneiderelectric.com.tr/Schneider_en/pdf/publications_ect/ECT183.pdf, em 2008/01

[22] Schneider Electric – Electric installation guide 2007, Chapter M – Harmonic Management

[23] Tony Hoevenaars, Kurt LeDoux, Matt Colosino: “Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications”

[http://www.harmonicsolutions.co.uk/library/Interpreting%20IEEE%20519%20\(1992\).pdf](http://www.harmonicsolutions.co.uk/library/Interpreting%20IEEE%20519%20(1992).pdf),
em 2008/01

ANEXOS

ANEXO A. Exemplo de programa de GAL

```
Name SCAD_GAL1 ;
PartNo GAL1 ;
Date 12-12-2007 ;
Revision 01 ;
Designer Rui Barbosa ;
Company EFACEC ;
Assembly None ;
Location None ;
Device g22v10 ;

/*****
/* DETECTOR DE CURTO-CIRCUITO - GAL1 */
*****/

/* ***** INPUT PINS ***** */
PIN 1 = clock ; /*TRIP para memorizar no caso de OC*/

PIN 13 = BR1_1_CC ; /* curto do diodo 1 do braco 1 */
PIN 14 = BR1_2_CC ; /* 2 */
PIN 11 = BR1_3_CC ; /* 3 */
PIN 10 = BR1_4_CC ; /* 4 */
PIN 9 = BR1_5_CC ; /* 5 */
PIN 8 = BR1_6_CC ; /* 6 */

PIN 7 = BR2_1_CC ; /* curto do diodo 1 do braco 2 */
PIN 6 = BR2_2_CC ; /* 2 */
PIN 5 = BR2_3_CC ; /* 3 */
PIN 4 = BR2_4_CC ; /* 4 */
PIN 3 = BR2_5_CC ; /* 5 */
PIN 2 = BR2_6_CC ; /* 6 */
```

```

/* ***** OUTPUT PINS ***** */
PIN 21 = BR1_CC1          ; /* falha de 1 ou mais diodos no braco 1 */
PIN 20 = BR2_CC1          ; /* falha de 1 ou mais diodos no braco 2 */

PIN 19 = BR1_CC2          ; /* falha de 2 ou mais diodos no braco 1 */
PIN 18 = BR2_CC2          ; /* falha de 2 ou mais diodos no braco 2 */

/* ***** LOGIC ***** */
BR1_CC1 = BR1_1_CC # BR1_2_CC # BR1_3_CC # BR1_4_CC # BR1_5_CC # BR1_6_CC;
BR2_CC1 = BR2_1_CC # BR2_2_CC # BR2_3_CC # BR2_4_CC # BR2_5_CC # BR2_6_CC;

BR1_CC2 =
(BR1_1_CC & BR1_2_CC) # (BR1_1_CC & BR1_3_CC) # (BR1_1_CC & BR1_4_CC) # (BR1_1_CC &
BR1_5_CC) # (BR1_1_CC & BR1_6_CC) #
(BR1_2_CC & BR1_3_CC) # (BR1_2_CC & BR1_4_CC) # (BR1_2_CC & BR1_5_CC) # (BR1_2_CC &
BR1_6_CC) #
(BR1_3_CC & BR1_4_CC) # (BR1_3_CC & BR1_5_CC) # (BR1_3_CC & BR1_6_CC) #
(BR1_4_CC & BR1_5_CC) # (BR1_4_CC & BR1_6_CC) #
(BR1_5_CC & BR1_6_CC);

BR2_CC2 =
(BR2_1_CC & BR2_2_CC) # (BR2_1_CC & BR2_3_CC) # (BR2_1_CC & BR2_4_CC) # (BR2_1_CC &
BR2_5_CC) # (BR2_1_CC & BR2_6_CC) #
(BR2_2_CC & BR2_3_CC) # (BR2_2_CC & BR2_4_CC) # (BR2_2_CC & BR2_5_CC) # (BR2_2_CC &
BR2_6_CC) #
(BR2_3_CC & BR2_4_CC) # (BR2_3_CC & BR2_5_CC) # (BR2_3_CC & BR2_6_CC) #
(BR2_4_CC & BR2_5_CC) # (BR2_4_CC & BR2_6_CC) #
(BR2_5_CC & BR2_6_CC);

```


ANEXO B. Manual do sistema

Manual do sistema SOCAD

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO	3
2 – RECTIFICADORES	3
3 – CONSTITUIÇÃO GERAL	3
4 – CONFIGURAÇÃO	3
4.1 – NÚMERO DE DÍODOS EM SÉRIE	3
4.2 – CONFIGURAÇÃO PARA DETECTOR DE CURTO-CIRCUITO OU CIRCUITO ABERTO	4
4.3 - CONFIGURAÇÃO PARA ASSOCIAÇÕES DE RECTIFICADORES	5
5 – DETECTOR DE CURTO : MODO DE FUNCIONAMENTO	6
6 – DETECTOR DE ABERTO : MODO DE FUNCIONAMENTO	6
7 – LIGAÇÃO DO SISTEMA	7
7.1 – LIGAÇÕES	7
7.2 – RESISTÊNCIA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE PARA OS OPTO-EMISSORES	7
7.3 – ENTRADAS DA PLACA DE DETECÇÃO	8
7.4 – SAÍDAS DA PLACA DE DETECÇÃO	8
8 – PROCEDIMENTO DE TESTE	8
8.1 - TESTES PARA O DETECTOR DE CURTO-CIRCUITO	8
8.2 - TESTES PARA O DETECTOR DE CIRCUITO ABERTO	9
9 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	10
10 – DIMENSÕES DAS PLACAS	11
10.1 – PLACA DE DETECÇÃO	11
10.2 – PLACA DE OPTO-EMISSION	11

1 - INTRODUÇÃO

Este documento visa ajudar á montagem, configuração e teste do sistema chamado de SOCAD. A placa do sistema SOCAD (*“Short and Open Circuit Arm Detector”*) pode detectar os dois tipos de falha dos díodos do rectificador. Tem de ser configurada para detector de curto-circuitos ou circuitos abertos dos dispositivos semicondutores.

2 – RECTIFICADORES

O sistema funciona para rectificadores de seis braços com vários díodos em série por braço. Estes rectificadores podem ser hexafásicos simples ou pontes trifásicas (ponte de Graëtz).

O sistema funciona também para associações de rectificadores em série e em paralelo.

3 – CONSTITUIÇÃO GERAL

O sistema para um rectificador é composto por uma placa de detecção e $n \times 6$ placas de opto-emissores, em que n é o número de díodos em série por braço.

A placa de detecção tem 36 opto-detectores permitindo um máximo de seis díodos em série por braço.

4 – CONFIGURAÇÃO

4.1 – NÚMERO DE DÍODOS EM SÉRIE

A placa permite a detecção de falhas em rectificadores com até seis díodos em série por braço. Para rectificadores com menos de seis díodos em série é necessário ligar o jumper entre os pinos 1 e 2 dos selectores junto aos detectores não utilizados (ver figura 1).

Exemplos de configuração:

Número de díodos por braço	Opto-detectores não utilizados	Selectores com os pinos 1 e 2 ligados
6	-	-
5	K6, K12, K18, K24, K30, K36	X10, X16, X22, X28, X34, X40
4	K5,K6, K11,K12,K17,K18, K23,K24, K29,K30, K35,K36	X9,X10, X15,X16, X21,X22, X27,X28, X33,X34, X39,X40

Nota: A ligação dos pinos 1 e 2 junto aos opto-detectores não usados é válida para o caso de detecção de curto-circuito e para o caso de detecção de circuito aberto.

4.2 – CONFIGURAÇÃO PARA DETECTOR DE CURTO-CIRCUITO OU CIRCUITO ABERTO

Para configurar a placa para detecção de curto-circuitos devem ser colocados todos os jumpers entre os pinos 2 e 3 de cada selector (ver figura 1) e as GAL devem ser programadas com os ficheiros JEDEC: "SCAD_GAL1.jed", "SCAD_GAL2.jed", "SCAD_GAL3.jed".

Para configurar a placa para detecção de circuitos abertos devem ser colocados todos os jumpers entre os pinos 1 e 2 de cada selector e as GAL devem ser programadas com os ficheiros JEDEC: "OCAD_GAL1.jed", "OCAD_GAL2.jed", "OCAD_GAL3.jed".

Na configuração de detecção de curto-circuitos e circuitos abertos existem também alterações nos componentes da placa pelo que se usam duas listas de material.

Na placa de detecção apenas mudam os valores das resistências associadas aos opto-detecores.

Na placa de opto-emissor é usado um de dois opto-emissores e o díodo é montado conforme a serigrafia da placa com o cátodo para a direita no caso do detector de curto-circuito (ver figura 2a) e com o cátodo para a esquerda para detecção de circuito aberto.

Lista de material para detector de curto-circuito:

	Componentes	Referência
Placa detecção	R1....R36	33K Ω
	R37....R72	100 Ω
Placa opto-emissor	K1	SFH756V
	K2	<i>não usado</i>
	V1	<i>ligado conforme serigrafia da placa</i>

Programação das GAL para o detector de curto-circuito:

	GAL 1	GAL 2	GAL 3
E.D.E.	SOCAD_U2	SOCAD_U4	SOCAD_U3
Checksum	F9A1	1F02	F92B
Nome ficheiro JEDEC	SCAD_GAL1.jed	SCAD_GAL2.jed	SCAD_GAL3.jed

Lista de material para detector de circuito aberto:

	Componentes	Referência
Placa detecção	R1....R36	100 Ω
	R37....R72	33K Ω
Placa opto-emissor	K1	<i>não usado</i>
	K2	SFH756V
	V1	<i>ligado ao contrário da serigrafia</i>

Programação das GAL para o detector de circuito aberto:

	GAL 1	GAL 2	GAL 3
E.D.E.	SOCAD_U2	SOCAD_U4	SOCAD_U3
Checksum	4C5E	7269	4BEB
Nome ficheiro JEDEC	OCAD_GAL1.jed	OCAD_GAL2.jed	OCAD_GAL3.jed

5 – DETECTOR DE CURTO : MODO DE FUNCIONAMENTO

A detecção de falhas de díodos por curto-circuito é feita por um conjunto de opto-receptores ligados por fibra óptica aos opto-emissores que estão em paralelo com cada díodo do rectificador. A detecção é feita por falha de impulsos de luz transmitida e sinalizada por relés de contacto normalmente aberto (NO).

Operação:

A alimentação da placa de detecção só deve ser ligada após o rectificador estar ligado caso contrário irá sinalizar falhas em todos os díodos.

No caso de falha de um díodo é fechado o relé que assinala em que braço ocorreu a falha.

Quando dois (ou mais) díodos de um mesmo braço do rectificador entram em curto-circuito é activado o relé de TRIP.

Os relés de sinalização de falhas só permanecem atracados enquanto as falhas persistirem e a alimentação da placa estiver ligada.

No caso de uma falha de alimentação no rectificador superior a 100ms, o sistema de detecção irá accionar os relés de falhas de todos os braços e o relé de TRIP.

Se o rectificador for desligado, por dispáro de protecção ou qualquer outro motivo, o sistema de detecção irá accionar os relés de falhas de todos os braços e o relé de TRIP.

6 – DETECTOR DE ABERTO : MODO DE FUNCIONAMENTO

Neste caso a detecção é feita por presença de impulsos de luz.

Operação:

No caso de falha por circuito aberto de qualquer um dos díodos é accionado o relé do braço correspondente juntamente com o relé de TRIP.

Os relés de sinalização de falhas só permanecem atracados enquanto as falhas persistirem e a alimentação da placa e do rectificador estiverem ligadas.

Se o rectificador for desligado, por dispáro de protecção ou qualquer outro motivo, todos os relés são desactivados.

7 – LIGAÇÃO DO SISTEMA

As placas de opto-emissores têm de ser ligadas com uma resistência de limitação de corrente em paralelo com os díodos do rectificador.

7.1 – LIGAÇÕES

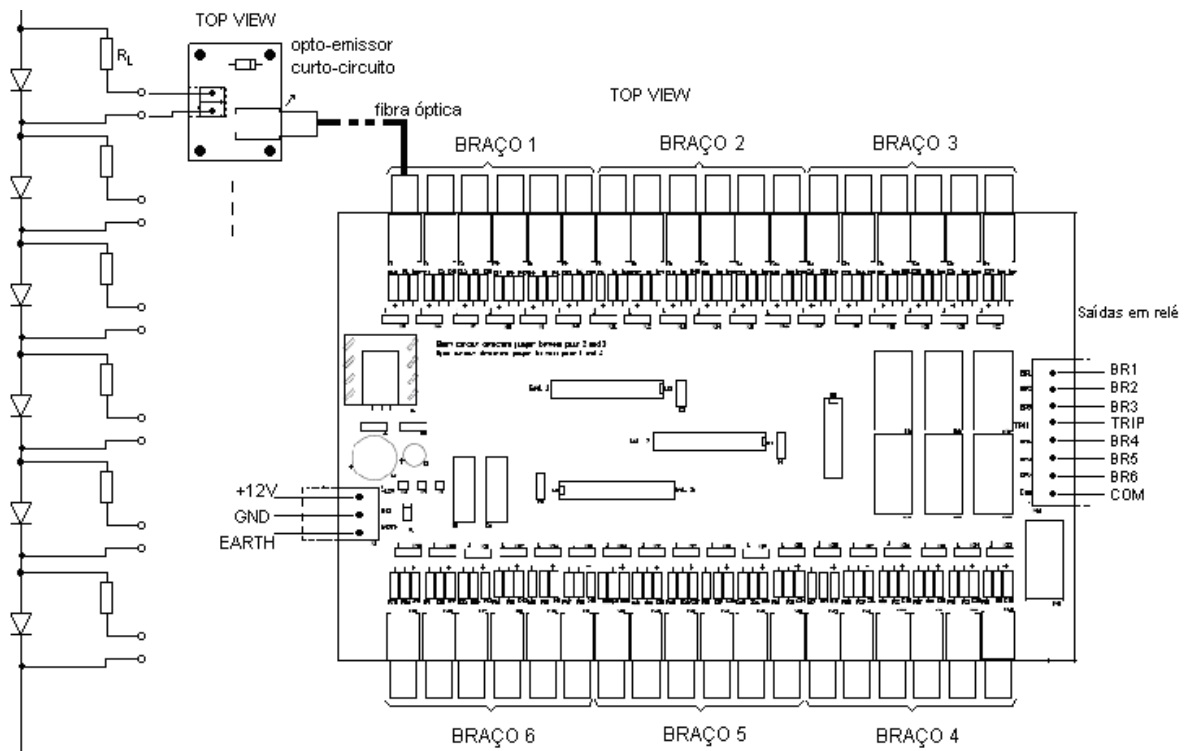


Figura 3 – Ligações das placas

7.2 – RESISTÊNCIA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE PARA OS OPTO-EMISSORES

É necessário usar uma resistência em série com cada opto-emissor.

Esta resistência tem de ser dimensionada de modo a limitar a corrente nos opto-emissores a cerca de $30mA$ no caso em que dois díodos estão em curto-circuito, que é o pior caso em termos de tensão inversa sobre os restantes díodos do braço.

Exemplo:

Para um rectificador hexafásico simples com tensão de alimentação de valor eficaz 2450V o valor calculado é de cerca de $78K\Omega$. Então podem-se usar duas resistências de $39K\Omega$ em série de potência igual ou superior a $25W$ cada, ou uma resistência entre $75K\Omega$ e $82K\Omega$ com potência igual ou superior a $50W$. Esta resistência é a mesma para a detecção de curto-circuito e de circuito aberto.

7.3 – ENTRADAS DA PLACA DE DETECÇÃO

Entrada de alimentação (conector X1).

36 fibras ópticas ligadas aos opto-deteciores.

7.4 – SAÍDAS DA PLACA DE DETECÇÃO

Saídas em relé normalmente aberto (NO) com ponto comum.

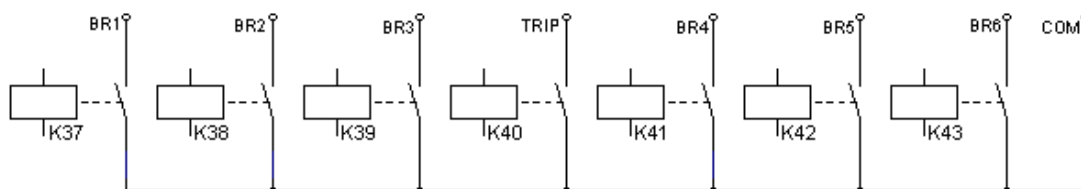


Figura 4 – Saídas da placa de detecção

8 – PROCEDIMENTO DE TESTE

8.1 - TESTES PARA O DETECTOR DE CURTO-CIRCUITO

Para testar apenas um braço, ligue todos os jumpers dos restantes braços nos pinos 1 e 2 dos selectores, e ligue 6 opto-emissores a uma fonte de sinais que gere uma onda quadrada de 0V a 5V de amplitude e 60Hz, conforme figura 5. Assim é possível testar um braço de cada vez.

Ao desconectar uma fibra óptica do braço o relé correspondente deverá atracar e ao desligar uma segunda fibra o relé de TRIP deverá atracar.

Se isso não acontecer verifique:

1. Se os emissores emitem luz vermelha olhando para a terminação da fibra óptica.
2. Se a tensão no terminal positivo de cada condensador de um opto-receptor é quase nula (nível lógico baixo) com a fibra óptica ligada. Se não for, pode haver falha do opto-detector.
3. Se a saída da GAL correspondente á falha do braço tem o nível lógico alto retirando-se uma fibra óptica. Pode-se medir a tensão na entrada do integrado U5. Pinos 1,2,3,5,6,7 correspondentes ás falhas nos braços 1,2,3,4,5,6 respectivamente.
4. Se apesar da saída ter nível alto o relé não atracar, o problema poderá ser do driver (U5) ou do próprio relé.

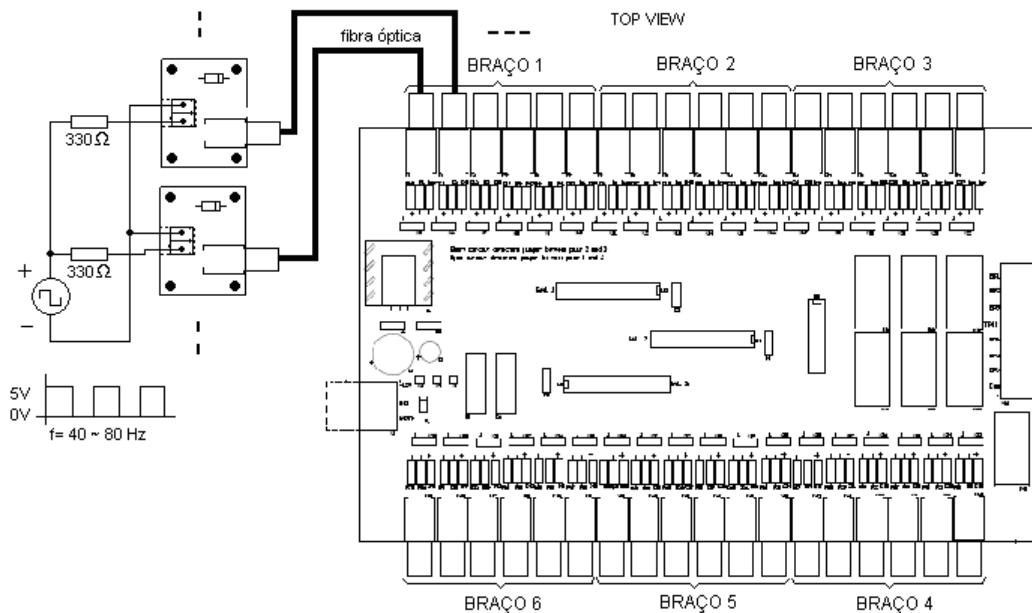


Figura 5 – Ligações para testes da placa de detecção

8.2 - TESTES PARA O DETECTOR DE CIRCUITO ABERTO

Os testes para este caso são idênticos ao caso anterior. A única diferença é que agora as fibras ópticas devem estar desligadas e as GAL programadas com os ficheiros correctos. Os jumpers devem estar ligados em todos os selectores nos pinos 1 e 2.

Ao ligar uma fibra óptica do braço o relé correspondente deverá atracar assim como o relé de TRIP.

Se isso não acontecer verifique:

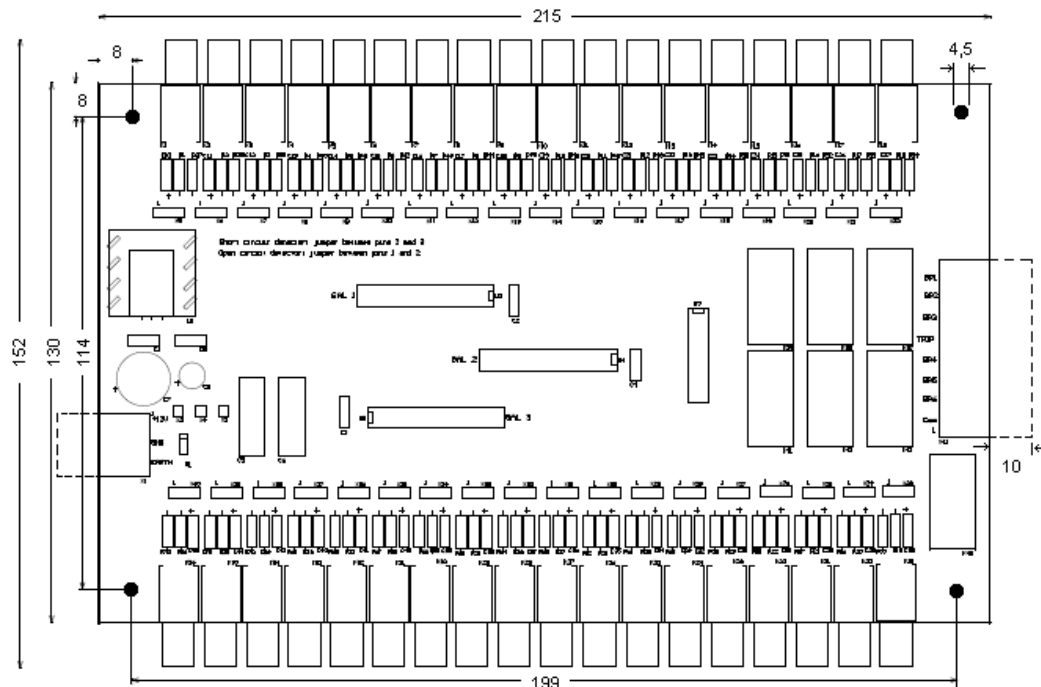
1. Se os emissores emitem luz vermelha olhando para a terminação da fibra óptica.
2. Se a tensão no terminal positivo de cada condensador de um opto-receptor tem nível lógico alto com a fibra óptica ligada. Se não, pode haver falha do opto-detector.
3. Se a saída da GAL correspondente á falha do braço e ao TRIP tem o nível lógico alto ligando-se uma fibra óptica. Pode-se medir a tensão na entrada do integrado U5. Pinos 1,2,3,5,6,7 correspondentes ás falhas nos braços 1,2,3,4,5,6 respectivamente e pino 4 correspondente ao sinal de TRIP. Se não tiver nível alto, apesar de haver pelo menos um condensador do braço com nível alto, pode haver alguma GAL defeituosa ou mal programada.
4. Se apesar da saída ter nível alto o relé não atracar, o problema poderá ser do driver (U5) ou do próprio relé.

9 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

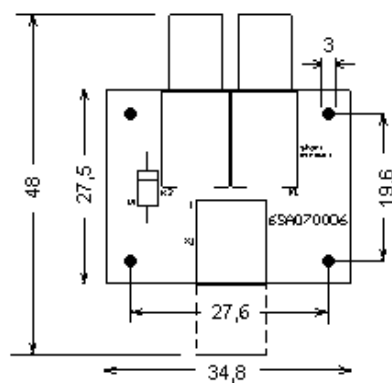
Alimentação		+12Vd.c., GND, EARTH Potência $\geq 5W$
Gama de tensão de alimentação		9,5V...18V
Opto-emissores	Referência	Infineon SFH756V
	Comp. onda pico	680nm
Opto-detectores	Referência	Infineon SFH350V
	Gama de foto-sensibilidade espectral ($S=10\%.S_{max}$)	400nm.....1100nm
Circuito lógico		GAL22V10
Relés	Referência	FINDER 32.21.7.012.2300
	Corrente nominal do contacto	6A
	Tensão nominal do contacto	250V a.c.
Fibra óptica	Material	Polímero
	Diâmetro cabo	1 mm
	Diâmetro fibra	500 μm
	Atenuação máxima aconselhada	0,3dB/m
	Distância máxima aconselhada do cabo (atenuação=0,3dB/m)	20m

10 – DIMENSÕES DAS PLACAS

10.1 – PLACA DE DETECÇÃO



10.2 – PLACA DE OPTO-EMISSION



Nota:

Vista de cima (TOP VIEW) com todas as dimensões em mm.